



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOHANNA HAKALAHTI  
EPÄTIIVIIN SISÄKUOREN VAIKUTUKSET JULKISIVUKORJ-  
SESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti  
Tarkastaja ja aihe hyväksyty  
28. toukokuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**JOHANNA HAKALAHTI:** Epätiivin sisäkuoren vaikutukset julkisivukorjauksessa  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 116 sivua  
Syyskuu 2018  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Rakennustuotanto  
Tarkastaja: professori Matti Pentti

**Avainsanat:** julkisivu, korjausrakentaminen, epätiivuus, akustiikka, rakennusfysiikka, paloturvallisuus, sisäkuori

Tässä diplomityössä tarkasteltiin 1940-60-luvuilla rakennettuja julkisivukorjauskohteita, joissa korjausratkaisuna on päädytty purkamaan julkisivu sisäkuoreen asti ja uusimaan kokonaan. Epätiivin ja tiivin sisäkuoren vaikutusta verrattiin eri julkisivurakennevaihtoehtoilla, ja julkisivurakenteiden toimivuutta tarkasteltiin akustiikan, rakennusfysiikan ja paloturvallisuuden kannalta. Tavoitteena oli määrittää uusilla julkisivurakennevaihtoehtoilla laskennallisesti epätiivin sisäkuoren vaikutus ilmajääleneristävyyteen ja lämmön ja kosteuden siirtymiseen rakenteessa ja varmistaa, että rakenteet ovat rakennusfysiikallisesti ja -akustisesti toimivia.

Vaikka korjauskohteissa ei tarvitse noudattaa uudisrakentamiselle vaadittuja ilmajääleneristävyysskriteereitä, julkisivua uusittaessa rakenteiden ilmajääleneristävyyden ei saa korjauksen yhteydessä heikentyä alkuperäisestä tilanteesta. Tiili- ja betonirunkoisille julkisivurakenteille laskettiin ilmajääleneristävyyttä sekä tiiviillä että epätiivillä rakenteilla, jolloin pystytään matemaattisesti havaitsemaan epätiivin sisäkuoren vaikutus ilmajääleneristävyyteen. Ääneneristyslaskennat tehtiin ensin kaksinkertaiselle kytkemättömälle rakenteelle, minkä jälkeen huomioidaan korjaustermein mineraalivillan absorptio ja rankareitin vaikutus lopullisessa ilmajääleneristävyydessä. Lopuksi verrattiin tiivistä julkisivurakennetta epätiiviseen julkisivurakenteeseen.

Valitun julkisivurakennevaihtoehtoon lisäksi tarkasteltiin epätiivimmän rakenteen riittävyyttä julkisivurakennevaihtoehtoksi. Tiiviitä rakennevaihtoehtoja mallinnettiin Wufi 2D-ohjelmalla, jolla määritettiin tuulensuojapinnan sisäpuolella ja ulkoilmassa olevia lämmön ja kosteuden arvoja. Epätiivien rakenteiden kosteuden ja lämmön siirtymistä laskettiin konvektiolla kulkeutuvan kosteusvirran avulla. Jos sisäkuoren halkeamat ovat liian suuria, kosteutta pääsee kulkeutumaan tiivistä rakennetta enemmän konvektiolla ilmavirran mukana rakenteisiin. Suurempi kosteusvirta aiheuttaa suuremman riskin vesihöyryn kondensoitumiselle mahdollistaen mikrobien kasvua ja lopulta rakenteiden homeutumisen. Julkisivurakenteista tutkittiin sisäkuoren halkeamien suuruuden vaikutusta rakenteen läpi kulkevaan ilmavirtaan ja sitä kautta kosteuden siirtymiseen rakenteessa.

Rakennusakustisesti määrävimmäksi tekijäksi ilmajääleneristävyyden kannalta muodostui rankareitin kautta kulkeva ääni, jolloin halkeamaleveydellä ei ollut suurta merkitystä ilmajääleneristävyyteen. Sisäkuoren epätiivuus ei siten aiheuta ilmajääleneristävyydessä heikennyksiä. Rakennusfysiikan kannalta halkeamat ja ilmavuodot aiheuttavat huomattavan kosteusvirran kasvun. Ilman diffuusiotiivistä lämmöneristekerrosta julkisivurakenne on liian herkkä vesihöyryn kondensoitumiselle rakenteessa.

## ABSTRACT

**JOHANNA HAKALAHTI:** Effects of permeable inner slab in facade renovation

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 116 pages

September 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Construction Management

Examiner: Professor Matti Pentti

**Keywords:** facade, renovation, permeability, acoustics, building physics, fire safety, inner slab

The purpose of this Master's thesis was to examine facades, which has been decided to renovated by replacing the external cladding and insulation. The effect of tight and permeable inner slab was compared with different renovation methods. The functionality of facade structures was examined for acoustics, building physics and fire safety. The aim was to mathematically determine the effect of permeable inner slab on airborne sound insulation, heat and moisture transfer in the facade structure and ensure that the structures are functional according to the laws of building physics and acoustics.

Although in renovation cases the required aberration criteria for new construction do not need to be complied, the airborne sound insulation of renovated buildings may not be reduced from the original situation. For brick and concrete facades, airborne sound insulation was calculated for both tight and permeable structures. The sound insulation calculations were first made for the double unconnected structure, after which the effect of the mineral wool absorption and line connections were considered by correction terms. Finally, the tight façade structure was compared to a permeable façade structure.

In addition to the chosen renovation method, the more permeable structure was examined. Tight facade alternatives were modeled by using the Wufi 2D program to determine the heat and relative humidity values in the open air and inside of the wind shield board surface. The moisture and heat transfer of the permeable structures were calculated by convection of a moisture flow. If the cracks in the inner shell are too large, moisture can be conveyed by air flow with convection to the permeable structures more than in tight structures. Greater relative humidity leads to a higher risk of condensation of water vapor, enabling the growth of microbes and ultimately the moulding of the structures. The effect of the size of cracks on the inner slab and the the airflow and transfer of moisture through the structure via cracks was studied.

As a acoustically the most dominant factor in the sound insulation of the air was the sound through the line connections, whereby the crack width did not have much to do with the sound insulation values. From the point of view of building physics cracks and air leaks cause considerable moisture current growth. Without a diffusive dense thermal insulation layer, the facade structure is too sensitive to water vapor condensation in the structure.

## ALKUSANAT

Tämä toinen diplomityöni on tehty A-Insinöörit Suunnittelu Oy:lle kevään ja kesän 2018 aikana. Työn tarkastajana on toiminut Tampereen teknillisestä yliopistosta professori Matti Pentti, ja työnohjaajina ovat olleet A-insinööreiltä julkisivukorjausrakentamisesta Saija Varjonen ja Kari Lehtola, akustiikasta Jesse Lietzén ja Ville Kovalainen ja rakennusfysiikasta Sami Musakka sekä Tampereen teknillisestä yliopistosta paloturvallisuuden liittyen Mikko Malaska. Haluan kiittää heitä avusta tätä työtä tehdessä sekä työka-vereitani A-insinööreillä, jotka ovat olleet tukemassa tämän diplomityön valmistumisessa.

Vastapainoksi tämän diplomityöni kirjoittamiselle pelasin koko helteisen kesän beach volleyta, joten kiitokset kuuluvat myös beach volley -pelikavereilleni. Vaikka diplomityöprosessi on ollut jälleen opettavainen, jääköön tämä viimeiseksi diplomityökseni.

Tampereella, 18.8.2018

Johanna Hakalahti

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	JULKISIVURAKENTEET .....	3
2.1	Julkisivurakenteet 1940-60-luvulla .....	3
2.1.1	Massiivitiilimuuri.....	3
2.1.2	Lämpöeristetty tiilimuuri.....	5
2.1.3	Betonisisäkuori .....	6
2.1.4	Kevyet ulkoseinärakenteet .....	7
2.2	Epätiivis sisäkuori.....	9
2.2.1	Huokoinen tiili .....	9
2.2.2	Halkeillut betoni .....	12
2.3	Julkisivurakenteiden toimivuuteen vaikuttavat tekijät .....	12
3.	JULKISIVUN UUSIMISEN ERITYISPIIRTEET .....	14
3.1	Julkisivukorjaustapojen jaottelu .....	14
3.1.1	Julkisivun paikkaus- ja pinnoituskorjaukset.....	15
3.1.2	Julkisivun peittävä korjaus .....	15
3.1.3	Julkisivun ulkokuoren purkaminen ja uusiminen .....	16
3.2	Julkisivuvaihtoehdot.....	16
3.2.1	Tuulettuva verhous.....	17
3.2.2	Eristerappaus .....	18
3.2.3	Kuorimuurin uusiminen .....	20
3.2.4	Kuorielementit .....	21
3.3	Sisäkuoren vaikutus julkisivun uusimiseen .....	21
3.3.1	Julkisivun oikaisutarve .....	21
3.3.2	Sisäkuoren halkeamat.....	23
4.	ILMAÄNENERISTÄVYYS JULKISIVURAKENTEISSA .....	25
4.1	Julkisivun ääneneristysvaatimukset.....	25
4.2	Ilmaääneneristys .....	26
4.2.1	Ilmaääneneristävyyden määrittäminen.....	27
4.2.2	Ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät .....	28
4.2.3	Rakojen vaikutus ilmaääneneristävyyteen .....	29
4.3	Ilmaääneneristävyyden teoreettinen tarkastelu .....	30
4.3.1	Yksinkertainen levyrakenne .....	31
4.3.2	Kytkemätön kaksinkertainen levyrakenne .....	35
4.3.3	Ilmavälin absorptiomateriaalin huomioiminen.....	37
4.3.4	Seinärakenteen rankareitin huomioiminen .....	38
4.3.5	Viivamaisen raon ilmaääneneristävyyden laskentateoria .....	39
4.3.6	Vertailukäyrämenetelmä ja spektripainotusermit .....	41
5.	JULKISIVUN RAKENNUSFYSIKAALINEN TARKASTELU .....	43
5.1	Lämmön siirtyminen rakenteissa.....	43

5.1.1	Lämmön johtuminen .....	43
5.1.2	Lämpösäteily .....	45
5.1.3	Lämmön konvektio .....	46
5.2	Kosteuden siirtyminen rakenteissa .....	46
5.2.1	Vesihöyryn diffuusio .....	47
5.2.2	Vesihöyryn konvektio .....	50
5.2.3	Veden kapillaarinen siirtyminen .....	50
5.2.4	Veden painovoimainen siirtyminen .....	52
5.3	Ilmavirtaus rakennuksessa .....	52
5.3.1	Ilman ominaisuudet .....	52
5.3.2	Rakennuksen paine-erot .....	53
5.3.3	Sisäkuoren ilmatiiveys .....	55
5.3.4	Ilmavirtausten vaikutus lämmön ja kosteuden siirtymiseen .....	56
5.3.5	Ilmavirran määrittäminen halkeamissa .....	57
6.	<b>RAKENTEELLINEN PALOTURVALLISUUS</b> .....	58
6.1	Korjausrakentamisen paloriskit .....	58
6.2	Lämmönsiirto tulipalossa .....	59
6.3	Julkisivurakenteiden palosuojaus .....	59
6.3.1	Paloluokat ja materiaalien luokitukset .....	60
6.3.2	Palosuojamateriaalit .....	62
6.4	Grenfell Towerin tulipalo .....	64
7.	<b>JULKISIVUN PURKU JA UUSIMINEN CASE-KOhteissa</b> .....	66
7.1	Kohde 1, tiilimuurirunko .....	66
7.2	Kohde 2, betonirunko .....	67
8.	<b>ILMAÄNENERISTÄVYYDEN LASKEMINEN</b> .....	69
8.1	Yksinkertainen levyrakenne .....	69
8.2	Kytkemätön kaksinkertainen levyrakenneseinä .....	73
8.3	Ilmavälin absorptiomateriaalin huomioiminen .....	75
8.4	Seinä rakenteen rankareitin huomioiminen .....	76
8.5	Sisäkuoren halkeamien huomioiminen .....	76
8.6	Kytketyn kaksinkertaisen levyrakenneseinän ilmaääneneristävyys .....	77
9.	<b>KOSTEUDEN JA LÄMMÖN SIIRTYMISEN MALLINTAMINEN</b> .....	79
9.1	Kosteusvirta diffuusiolla .....	79
9.1.1	Materiaaliominaisuudet .....	80
9.1.2	Sisäilman kosteuslisä .....	82
9.1.3	Homehtumisherkyys .....	83
9.2	Kosteusvirta konvektiolla .....	85
9.2.1	Ilmavirran laskeminen halkeamissa .....	85
9.2.2	Ilmavirran mukana siirtyvä kosteus .....	89
10.	<b>TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU</b> .....	90
10.1	Rakennusakustinen toimivuus tiiviillä rakenteilla .....	90
10.2	Rakennusakustinen toimivuus epätiivillä rakenteilla .....	93

10.3 Rakennusfysikaalinen toimivuus tiiviillä rakenteilla.....	97
10.4 Rakennusfysikaalinen toimivuus epätiiviillä rakenteilla .....	103
10.5 Virhetarkastelu .....	107
11. YHTEENVETO.....	109
LÄHTEET .....	112

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	pinta-ala
$\alpha$	päätekorjaus
$\alpha$	absorboituneen säteilyn osuus
$\alpha_c$	absorptiosuhde
$\alpha_{eff}$	tehollinen absorptiosuhde
B	taivutusjäykkyys
B	tunkeutumiskerroin
b	viivakytKentöjen eli rankojen välinen etäisyys
b	halkeamaleveys
$\beta$	raon/halkeaman leveys
c	äänen nopeus ilmassa
$C_{tr}$	spektripainotusermi tieliikennemelua vastaan
d	materiaalin paksuus/ilmavälin suuruus
$\delta_p$	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryyn osapaine-eron mukaan
$\delta_v$	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron mukaan
E	kimmomoduuli
e	päätekorjauskertoin
$\varepsilon$	emissiviteetti
$E_{eff}$	efektiivinen kimmomoduuli
f	taajuus
$f_{11}$	alin ominaistajuus
$f_c$	koinsidenssirajataajuus
$f_{cav}$	kaviteetin rajataajuus
$f_d$	rajataajuus
$f_h$	leikkausaaltoalueen rajataajuus
$f_{mam}$	massa-ilma-massa resonanssitaajuus
FR	täyttösuhde
$g_{diff}$	diffuusion kosteusvirta
$g_{conv}$	konvektion kosteusvirta
h	rakenteen paksuus
$I_0$	neliömomentti
K	dimensioton suure
k	lämmönjohtavuus
L	dimensioton suure
l	raon syvyys
$l_x$	rakenteen leveys
$l_y$	rakenteen korkeus
m	dimensioton suure
$m'$	pintamassa
n	dimensioton suure
$\eta$	häviökerroin
$\eta$	ilman viskositeetti
$\eta_{int}$	sisäinen häviökerroin
p	paine
$\Delta p$	paine-ero
$\rho$	heijastuneen säteilyn osuus
q	lämpövirran tiheys
Q	ilmavirta



$R$	ilmääneneristävyys
$R_v$	kaasuvakio
$RH$	suhteellinen kosteus
$\Delta R_{cav}$	absorptiomateriaalista riippuvainen ilmaaneneristävyiden muutos
$\Delta R_m$	rankareitin ilmaaneneristävyiden korjaustermi
$\Delta R_{fb}$	joustavan rangan ilmaaneneristävyiden korjaustermi
$S$	pinta-ala
$T$	lämpötila
$t$	aika
$\tau$	läpimenneen säteilyn osuus
$\nu$	Poissonin vakio
$\nu$	vesihöyrypitoisuus
$\nu_{sat}$	vesihöyryn kylästyskosteuspitoisuus
$W$	ääniteho
$X$	veden tunkeutumissyvyys
$X_{A,i}$	spektripainotusermin tieliikennemelun vastaan huomioiva ilmaaneneristävyys
$y$	vetojäykkyysskeskiö
$\gamma'$	Eulerin vakio
$Z$	vesihöyrynvastus

# 1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tavoitteena on määrittää epätiiviseen sisäkuoreen asti puretun julkisivurakenteen toimivat korjausvaihtoehdot ja korjaamisessa huomioitavia tekijöitä. Uuden korjatun julkisivun toimivuutta tarkasteltaessa on huomioitava muun muassa rakennusfysikaalinen toimivuus lämpö- ja kosteustekniikan osalta. Uuden julkisivurakenteen tulee täyttää paloturvallisuusasetusten mukaiset palovaatimukset, ilmajärjestävyys ei saa heiketä korjatussa julkisivurakenteessa eikä uusien rakennemateriaalien kustannukset saa kohota liian korkeiksi. [1,2]

Tarkasteluun valittiin käytännön kohteita, joissa korjausratkaisuna on julkisivurakenteen purkaminen sisäkuoreen asti. Tarkoituksena on selvittää julkisivurakenteen rakennusfysikaalinen, palotekninen ja akustiikan toimivuus tiilimuurisisäkuorella ja betonisisäkuorella. Epätiivillä sisäkuorilla ilma virtaa rakenteissa rakojen ja halkeamien kautta, ja tavoitteena on määrittää ilmanvirtauksen määrä rakenteen läpi sisäkuoren ollessa epätiivis. Ilmavirran määrän avulla laskettiin kosteusvirta rakenteissa. Osatavoitteena on määrittää valituille rakennetyypeille toimivat korjausratkaisut ulkokuoren purkamisen jälkeen. Lisäksi tiilen epätasainen pinta aiheuttaa haasteita sopivan rakennemateriaalin valinnassa, koska materiaalipaksuuksien kasvaessa myös kustannukset kohoavat helposti liian suuriksi.

Tässä työssä on keskitytty asuinkerrostalojen julkisivurakenteisiin 1940-60-luvuilla. Ulkoseinät voidaan jakaa rakennustyyppiltään ja –materiaaliltaan kolmeen eri ryhmään. Ensimmäisen ryhmän massiiviset ulkoseinät koostuvat yhdestä homogeenisestä rakenteesta, joka on samalla sekä kantava että lämpöä eristävä seinärakenne. Toisessa ryhmässä seinärakenne koostuu kantavasta massiivisesta rakenteesta ja erillisestä lämmöneristysosasta. Kantavana osana on tiilimuuri tai betoniseinä. Kolmannessa ryhmässä on kevyet ulkoseinärakenteet. [3]

Muurauksella 1940-60-luvuilla ei ole ollut laatuvaatimuksia, joten sen ajan tiilimuuri ei ole yhtä ilmatiivis eikä muuraustyö vastaa nykyajan muurattuja tiiliseiniä ja niiden laatuvaatimuksia. Usein seinärakenteiden ilmanpitävyydessä esiintyy puutteita. Suurimmat ilmavuodot julkisivurakenteissa syntyy liitoskohtien kautta ja rakenteiden epätiiviskohdista. Sen lisäksi huokoisena materiaalina tiili aiheuttaa ilmavuotoja seinärakenteessa tiilen läpi. Ilmavuodot on huomioitava lämmön ja kosteuden siirtymisessä rakenteessa. Rakennuksen sisä- ja ulkoilman paine-erojen avulla määriteltiin ilmavirran suuruutta rakenteissa. [3, 4]

Korjausratkaisuja tutkittiin kirjallisuusselvityksellä ja laskennallisella tarkastelulla. Ilma- ja kosteusvirran määrää laskettiin epätiiviiin sisäkuoren halkeamien läpi. Sen lisäksi rakennusfysikaalisen toimivuuden takaamiseksi lämmön ja kosteuden siirtymistä rakenteissa mallinnettiin Wufi 2D-ohjelmalla. Korjauskohteet on rajattu tässä diplomityössä asuinkerrostaloihin, jolloin julkisivurakenteet ovat lämpökuormaltaan riittävän lähellä toisiaan. Siksi rakennuksien seinien läpi kulkeutuvat lämpökuormaerot eivät ole liian suuret eri case-kohteiden välillä, ja rakennusfysikaalinen tarkastelu case-kohteiden välillä on helpommin verrattavissa. Mallinnuksessa laskettiin ideaalitapauksen kosteus- ja lämpötekninen käyttäytyminen, kun oletetaan sisäkuoren olevan täysin tiivis. Kosteutta siirtyy rakenteisiin diffuusiolla rakenteiden läpi ja konvektiolla ilmavirran mukana rakenteiden halkeamista ja muista epätiivieyskohdista [5]. Epätiiviiin sisäkuoren vaikutusta rakenteeseen kerääntyvän kosteuden määrään pohdittiin vertaamalla diffuusion ja konvektion avulla kulkeutuvaa kosteusvirtaa. Mahdollista kosteuden kondensoitumista rakenteessa tarkasteltiin lämpötilan ja suhteellisen kosteusarvojen avulla. Lisäksi määriteltiin case-kohteille riski homeenkasvulla homeindeksin avulla.

Mallinnuksessa ei pystytä esimerkiksi täysin huomioimaan epätiiviiillä tiilimuurilla esiintyvää ilmavuotoa rakenteen läpi. Mallinnuksen yksinkertaistukset ja epävarmuustekijät materiaalivalinnoissa aiheuttavat virhettä tuloksiin, ja luotettavimmat tulokset saataisiin yhdistämällä mallinnus ja kohteissa tapahtuvat mittaukset. Lämpö- ja kosteusmittaukset case-kohteissa rajattiin kuitenkin tämän diplomityön ulkopuolelle.

1.1.2018 voimaan tulleen Ympäristöministeriön rakennuksen ääniympäristöasetuksen mukaan ilmaääneneristävyys ei saa heiketä julkisivukorjauksen yhteydessä [1]. Akustisen toimivuuden takaamiseksi ilmaääneneristävyyttä tarkasteltiin matemaattisesti määrittämällä ilmaääneneristävyys kaksinkertaisilla kytkemättömillä rakenteilla, kaksinkertaisilla kytketyillä rakenteilla ja epätiiviiillä halkeamia sisältävällä tiili- ja betonisäkuorilla. Kaksinkertaisilla kytkemättömillä rakenteilla ei huomioida julkisivussa olevia rankareittejä, joita pitkin ääni kulkeutuu eikä ilmavälissä olevaa mineraalivilla, joka absorboi ääntä. Kaksinkertaisilla kytketyillä rakenteilla ilmavälin absorptio ja rankareitin vaikutus on huomioitu, jolloin saadaan laskennallisesti selville ilmaääneneristävyys tiiviillä rakenteilla. Gomperts ja Kihlmanin viivamaisen raon laskentateorian avulla määritettiin halkeamia sisältävän sisäkuoren vaikutus ilmaääneneristävyysarvoihin. [6, 7]

## 2. JULKISIVURAKENTEET

Julkisivurakenteista tarkastellaan rakenteita 1940-60-luvulla. Lisäksi tarkastellaan epätiivin sisäkuoren vaikutuksia julkisivujen uusimiseen. Sisäkuorivaihtoehdot on rajattu tiileen ja betoniin. Huokoisena materiaalina tiilen materiaaliominaisuudet muodostavat reunaehtoja julkisivurakenteiden uusimisessa. Betonissa voi esiintyä julkisivurakenteiden vaurioitumisen myötä halkeamia, jotka pitää myös ottaa huomioon puretun julkisivun korjaamisessa. [5]

### 2.1 Julkisivurakenteet 1940-60-luvulla

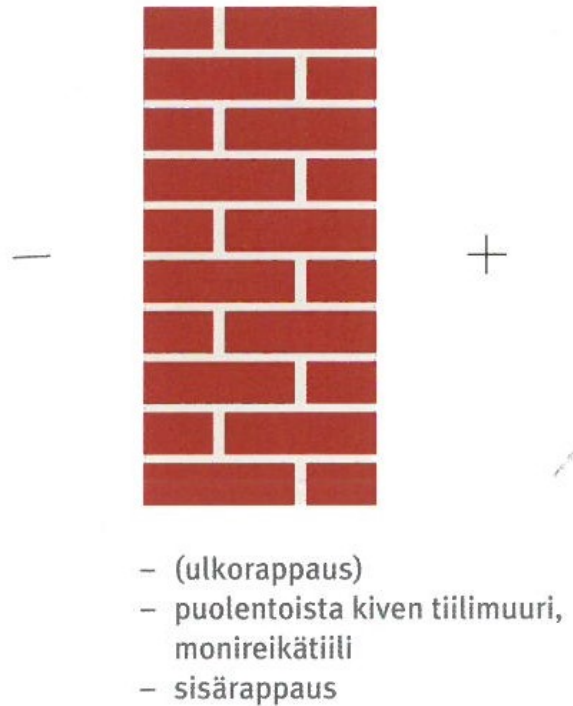
1940-luku ja 1950-luvun alku olivat kerrostalorakentamisessa sodan ja jälleenrakentamisen aikaa, mitä leimasi pula rakennusmateriaaleista. Vuoteen 1952 asti rakennusmateriaaleja säännösteltiin ja pula-ajan ongelmia ratkaistiin niukalla mitoituksella, korvikemateriaalien käytöllä ja rakennusmateriaalien kierrättämisellä. 1940-50-luvulla rakenteet, rakennusmateriaalit ja -menetelmät muuttuivat voimakkaasti. Sodan jälkeen rakentaminen oli vilkasta, ja suurin osa rakennuksista tehtiin maaseudulle. [4]

Erilaisia rakennuksen runkoratkaisuja oli useita: tiilimuurirunko, sekarunko, betonipilarirunko, betoniseinärunko ja kirjahyllyrunko. Rakennuksen runkorakenteiden yleisimmät rakennusmateriaalit ovat puu, betoni, teräs ja muurattu tiili [11]. 1940-luvun alussa rakentamisen kehitys keskeytyi sodan takia. Sodan jälkeen 1940- ja 1950-luvun loppuilla julkisivurakenteet olivat sekarunkoisia teräsbetonirakenteita. 1960-luvun lopulla rakentamisessa alettiin käyttää esivalmistettuja rakennusosia. 1950-luvulla tehtiin ensimmäisiä betonielementtikokeiluja, ja ensimmäiset esivalmistetut rakennusosat olivat betonielementtisiä porrassyöksyjä. Betonielementtirakentamista esiintyi maailmalla jo 1940-luvulla. Suomessa betonielementtirakentaminen yleistyi kuitenkin vasta 1960-luvulla tekniikan matalan tason ja materiaalipulan vuoksi. [3, 8]

#### 2.1.1 Massiivitiilimuuri

Runkorakennetyypeistä tiilimuurirungossa kantavat pystyrakenteet olivat tiilimuureja, mutta osa seinistä saatettiin korvata teräsbetonipilareilla. 1950-luvulta lähtien normaalkokoisten tiilten ohella saatettiin käyttää myös isompia suurttiiliä. Huoneisten välisen kantavan seinän paksuus oli yleensä yhden kiven paksuinen eli normaalikokoisilla tiilillä 27 cm tai suurttiilillä muurattuna 16 cm tai 20 cm. Suurttiiliä käytettiin muuraustyön nopeuttamiseksi. Lisäksi tiililavoja käytettiin tiilten kuljettamiseen, millä saatiin tehostettua muurausprosessia entisestään. [4]

Suomessa tiiltä on käytetty rakennusmateriaalina jo 700 vuotta [9]. Savitiili keksittiin kuitenkin jo 5000 vuotta sitten Kaksoisvirranmaassa [18]. Massiivitiilimuuri on yksi kerrostalorakentamisen perustyypeistä ja yleisin asuinkerrostalotyyppi ennen 1940-lukua. Massiivitiilimuurirakenne on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Puolentoista kiven tiilimuurirakenne [4].

Puolentoistakiven paksuiset tiilimuurit toimivat kantavina pystyrakenteina. Tiilimuurirungossa ulkoseinien, keskirungon ja porrashuoneiden kantavat pystyrakenteet ovat tiilestä. Perinteisessä julkisivutyypissä ennen sota-aikaa tiilimuri oli kahden kiven paksuinen eli noin 600 mm. [3, 10]

Massiivisia tiilimuurirakenteita käytettiin toiseen maailmansotaan asti. Tyypillisesti tiilimuurijulkisivu oli alhaalta paksumpi kuin ylemmissä kerroksissa. Alimmissa kerroksissa esiintyi kahta kiveä paksumpiakin paksuuksia. Yleensä käytettiin punatiiltä ja kalkkilaasteja, mutta myös esimerkiksi sementtitiiltä käytettiin. Sodan jälkeen seinämäpaksuuksia vähennettiin puolentoista kiven paksuuteen, jolloin tiilimuurit olivat joko eristettyjä yhden kiven tai eristämättömiä puolentoista kiven reikätiilimuureja. [3, 10,11]

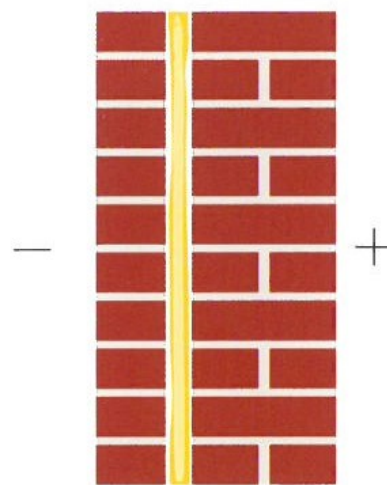
Massiivisille tiiliseinille tyypillisiä ominaispiirteitä ovat vähäinen halkeilutaipumus jäykän ja homogeenisen rakenteen ansiosta, riittävät lämmöneristysominaisuudet kahden kiven paksuisella tiilimuurilla ja riittävä pitkäaikaiskestävyys erityisesti puhtaaksimuuruilla tiiliseinillä. Lisäksi homogeeninen tiiliseinä on hyvä alusmateriaali rappauskestävyyden suhteen sekä rappauksen uusimisessa. [10]

## 2.1.2 Lämpöeristetty tiilimuuri

Pula tiilestä edesauttoi massiivisista tiilimuureista luopumista. Ulkoseiniä ohennettiin kahden kiven seinämävahvuudesta, ja tiilimuriin yhdistettiin lämmöneristekerros kevyt-betonista, mineraalivillasta tai lastulevystä. Ulkoseinät ja porrashuoneiden seinät ovat massiivisia tiilimuureja, ja keskirungon alueella on betonipilarit. Tiilimuriin voi liittyä myös lämmöneristeosa. [3, 4]

Sekarunko oli yleisin ulkoseinärakennetyyppi 1940-luvulla ja 1950-luvun alkuun saakka. 1940-luvulla käytettiin lähes yksinomaan sekarunkoa asuin kerrostaloissa kaksikerroksisten puurankatalojen ohella. Sekarunkoisissa rakennuksissa oli sekä tiilimuria että betonia kantavissa pystyrakenteissa, ja runkotyyppi koostui kahdesta kantavasta pystyrakenteesta. Kerrostalokorkeudet vaihtelivat 2-7 kerroksen välillä, ja yleisin kerroskorkeus oli 3-4 kerrosta. Ulkoseinänä oli eristetty tai eristämätön kantava tiilimuri, ja keskirunko oli tuettu pilareilla. Kaikki väliseinät porrashuonetta lukuun ottamatta oli kevytrakenteisia. 1950-luvulla pilarirungot olivat betonisia, ja betonipilarirungon käyttö yleistyi teollisuusrakennuksista. [4, 10, 11]

Lämpöeristetty tiilimuurirakenne on esitetty kuvassa 2.



- (ulkorappaus)
- puolen kiven tiiliverhous
- mineraalivilla 25–50 mm
- yhden kiven tiilimuri / suurttiili 200 mm
- sisärappaus

**Kuva 2.** Lämpöeristetty tiilimuurirakenne [4].

Lämpöeristetyssä tiilimuurissa on puolen kiven tiilverhous, 25-50 mm paksuinen mineraalivillaeriste ja sisäkuorena yhden kiven tiilimuri tai 200 mm paksu suurttiili. Porrashuoneen seinät ovat massiivitiilimuurista. Betonipilareiden käytön syy on taloudellinen ja tekninen, eikä sillä pyritty vapaampiin pohjaratkaisuihin. [3, 4, 8, 11]

Kuorimuurin käyttö yleistyi 1950-luvulla lämmöneristemateriaalien kehittymisen ansiosta. Kuorimuri on kerroksellinen rakenne, joka koostuu erillisestä muuratusta ulkokuoresta, lämmöneristeestä ja muuratusta, betonisesta tai puurankaisesta sisäkuoresta. Jos sisäkuori on kantava rakenne, sisäkuori on muurattu tai betonirakenne. Kuorimuri on ulkopinnaltaan rapattu tai puhtaaksimuurattu. Muurauslaastina on ollut joko kalkkisementtilaasti tai muurausmenttilaasti. Vanhojen rakennusten kuorimuurirakenteessa ei välttämättä ole tuuletusväliä ollenkaan, ja tuulettumattomia kuorimuurirakenteita on tehty vielä 1980-luvun lopussa. [12]

Tiili-villa-tiili ulkoseinärakenne oli tyypillinen 1960-luvulle asti. Lämmöneristekerros oli tyypillisesti mineraalivillasta. Rakennetyypissä ei ollut tuuletusväliä, minkä puuttuminen hidastaa lämmöneristeiden kuivumista. Ulkoseinärakenteiden tuuletusväli alkoi yleistyä vasta 1980-luvulla. Muuratun ulkokuoren saumoista ja liittymäkohdista vesi pääsi kulkeutumaan mineraalivillaeristeisiin. [3, 4]

### **2.1.3 Betonisisäkuori**

Betoniseinärungosta muotoutui yleisin runkotyyppi 1950-luvulla kasvaneen suurmuottitekniikan myötä [8]. Kaikki kantavat pystyseinärakenteet olivat paikalla valettuja betoniseiniä, jotka eristettiin ulkopuolelta usein kevytbetonilla ja julkisivu rapattiin. Jos eristemateriaalina käytettiin lastuvillalevyä tai mineraalivillaa, seinät verhottiin asbestisementtilevyllä, tiilellä tai poimupellillä. Valussa käytettiin aluksi yksittäisistä laudoista koottuja valumuotteja, joista siirryttiin vaneripintaisiin pieniin kasettimuotteihin ja lopulta torninosturin käyttöä vaativiin suurmuotteihin. Ensimmäinen suurmuottitekniikalla valettu talo valmistui Kuopiossa 1958. [4]

Betoni syrjäytti tiilen 1950-luvun puolivälissä, minkä jälkeen betoni oli tiiltä yleisempi rakennusmateriaali kantavissa rungoissa. Betonirunkorakenteiden yhteydessä julkisivumateriaalina käytettiin 1950-luvulla kevytbetonia, asbestisementtilevyä tai puolenkiven tiilverhousta. Myös 1960-luvulla jatkui betonisten seinien käyttö rakennuksissa. Yleensä kaikki kantavat pystyrakenteet ja huoneistojen väliset kantavat seinät olivat betoniseiniä. Osa kantavista pystyrakenteista saatettiin korvata teräsbetonipilareilla. Betonisia julkisivun runkorakenteita on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 3.** Betonirunkorakenteita [4].

Kaikissa julkisivurakenteissa on sisäkuoren rakennusmateriaalina 150-160 mm paksuinen teräsbetoni. Vasemmalla julkisivurakennevaihtoehdossa on betonin ulkopuolella 175 mm paksuinen kevytbetoni tai 200 mm paksuinen kevytsorabetoni. Keskimmaisessä julkisivurakennevaihtoehdossa betonin ulkopintaan laitettiin mineraalivilla ja tuulensuojalevy, jonka jälkeen rakenteessa on tuuletusväli ja ulkopintaan laitettiin asbestisementtilevy, julkisivulasi tai teräs-, kupari- tai alumiinipelti. Oikean puoleisessa julkisivurakennevaihtoehdossa betonin pinnassa oli mineraalivillaa 50-100 mm, ja ulompana kerroksena puolen kiven tiiliverhous. [4]

1960-luvulla yleistyi myös voimakkaasti betonisandwich-rakenne. Ensimmäisissä betonielementeissä käytettiin lämmöneristeenä lastuvillalevyä, joka korvattiin myöhemmin mineraalivillaeristeellä sandwichelementtien tehdastuotannon alkamisen myötä. Puolielementtirakentamisessa paikallavalettuihin kantaviin väliseiniin tyypillisesti lisättiin sandwichelementit. Myöhemmin elementtien valmistaminen siirtyi kokonaan tehtaisiin. Elementtien käyttö oli tyypillistä 1960-luvulla pitkien ei-kantavien julkisivujen rakentamisessa. Yleensä betonisandwichelementtien uloimman betonikerroksen paksuus oli 50 mm. Ohuemmilla betonikerroksilla raudoitteen ympärillä ei olisi ollut riittävästi betonipaksuutta raudoitteiden suojana. Sisäpuolisen betonikerroksen paksuus oli tavallisesti 70-110 mm. [8]

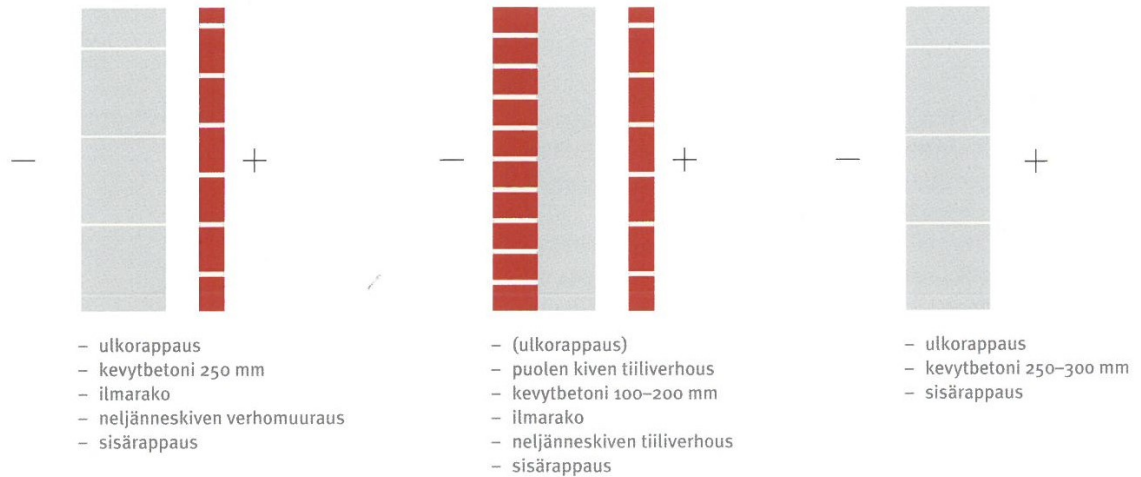
### 2.1.4 Kevyet ulkoseinärakenteet

Elementtirakentamisen kehittymisen vuoksi betoniseinärungosta kehitettiin kirjahyllyrunko, jossa pitkät julkisivut olivat kevytrakenteisia seiniä, eivätkä enää olleet osana talon kantavaa runkoa. Ainoastaan poikittaiset väliseinät, päätyseinät ja porrashuoneen seinät olivat kantavia rakenteita. Huoneistojen väliset seinät olivat kantavia betoniseiniä. Kevyitä ulkoseinärakenteita käytettiin myös betonipilarirunkoratkaisuissa, joissa väliseiniin



lisäksi myös ulkoseinät olivat kevyitä seinärakenteita. Betonipilarirunkoisia rakennuksia rakennettiin jonkin verran 1940-50-luvuilla. [3, 4]

Kuvassa 3 on kevyitä ulkoseinärakennevaihtoehtoja.



**Kuva 4.** Kevyitä ulkoseinärakenteita [4].

Julkisivurakennevaihtoehdoissa vasemmalla on esitetty tiilisisäkuorirakenne, jossa tuuletusvälin jälkeen ulkopinnassa on 250 mm kevytbetoni. Keskimmaisessä julkisivurakennevaihtoehdossa on samoin tiilisisäkuorirakenne, mutta tuuletusvälin jälkeen kevytbetonia on 100-200 mm. Uloimpana on puolen kiven tiiliverhous. Oikean puoleisessa julkisivurakennevaihtoehdossa on ainoastaan 250-300 mm paksuinen kevytbetoni. Kaikissa kevyissä ulkoseinärakennevaihtoehdoissa on rappaus seinärakenteen molemmin puolin. [4]

Kevyet ulkoseinärakenteet muodostuivat ainoastaan lämmöneristeestä, lämmöneristeestä ja eristeen sisä- ja ulkopuolisesta verhousrakenteesta tai lämmöneristeestä ja eristeen sisäpuolisesta verhousrakenteesta [3]. Yleisin lämmöneristemateriaali oli kevytbetoni. Kevytbetonia alettiin käyttää ensimmäisen kerran 1930-luvulla, kun alettiin valmistaa tehdasvalmisteisesti höyrykarkaistua kevytbetonia. Karkaisematonta kevytbetonia alettiin käyttää 1940-luvulla. Kevytbetoni rakenne muodostui, kun betoniseokseen lisättiin kemiallisesti emulsion avulla ilmakuplia. Sotien jälkeen kevytbetonia käytettiin laajasti, koska muita eristemateriaaleja, kuten korkkia ja insuliittia, oli heikosti saatavilla. [8]

Kevyissä ulkoseinärakenteissa voitiin käyttää myös puuta, jota käytettiin erityisesti pien-taloissa. Puu on vanhin rakennusmateriaali julkisivuissa. Puurankarunkoa käytettiin kak-sikerroksisissa taloissa runkona 1950-luvun loppuun saakka. Heti sota-ajan jälkeen puu-runkoa käytettiin paljon muiden rakennusmateriaalien puutteen vuoksi. Puurankarunkoi-sissa ulkoseinärakenteissa käytettiin lämmöneristeinä kutterilastua tai sahanpurua. Läm-möneristeen ja puulaudan väliin asennettiin tervapaperia höyrynsulkuna. Puurakennukset verhottiin öljy- tai lietemaalatuilla laudoilla. [3, 8, 10]

Puun edut runkorakenteena ovat sen hyvät lujuusominaisuudet, keveys ja helppo työstettävyys. Puuta on voitu käyttää rakennuksen osissa, joissa vaaditaan hyvää lämmöneristyskykyä. Lisäksi puuta on ollut aina saatavilla. Puun liitoskohdat vaativat rakentamisessa suuren työmäärän, mikä aiheuttaa epätaloudellisuutta. Perinteisesti puu on ollut pientalojen rakennusmateriaali. Materiaaliominaisuuksien puolesta kuusi ja mänty ovat soveltuneet parhaiten runkorakenteiden rakennusmateriaaliksi. [11]

Puurakennukset tehtiin hirrestä 1940-luvulle saakka. Hirsiseinä muodosti rakennuksen kantavan rungon ja toimi samalla myös lämmöneristeenä. Hirsipintaa ei tarvinnut erikseen päällystää sisäpuolelta eikä ulkopuolelta. Hirret liikkuivat hieman rakentamisen jälkeen, mikä aiheutti ongelmia mittapysyvyyden suhteen. Sen vuoksi rakennustyöt voitiin viimeistellä vasta hirsien kuivumisen jälkeen. Hitaan rakennusprosessin takia ja sahateollisuuden yleistyessä puusta alettiin 1800-luvulla tehdä rankarunkoisia asuintaloja, jotka voitiin rakentaa valmiiksi samalla kertaa. Puurankoinen seinä syrjäytti hirsirungon vasta toisen maailmansodan jälkeen pienten 2-kerroksisten asuinkerrostalojen seinärakenteina. [11]

## 2.2 Epätiivis sisäkuori

Julkisivurakenteen valintaan vaikuttaa muun muassa sisäkuoren materiaaliominaisuudet. Sisäkuoren ollessa epätiivis, aiheutuu huokoisen tiilen tai halkeilleen betonin läpi muun muassa ilmavuotoja tai lämmön- ja kosteuden siirtymistä. Huokoisena materiaalina tiilen valmistusprosessi vaikuttaa omalta osaltaan tiilisisäkuoren materiaaliominaisuuksiin ja sitä kautta myös julkisivurakennevaihtoehtoihin korjaamisen tai uusimisen yhteydessä. Betoni on materiaaliltaan tiiviimpi kuin tiili, mutta betonisisäkuoresta voi muodostua epätiivis esimerkiksi betonissa olevien halkeamien, ilmavuotojen ja liittymäkohtien myötä. Halkeillut betoni voi myös olla epätiivis ja ilmatiiveys julkisivurakenteessa heikkenee halkeamien takia. [5, 14]

### 2.2.1 Huokoinen tiili

Tiili on huokoinen materiaali, mikä läpäisee vettä. Tiili valmistetaan savesta, hiekasta ja vedestä, ja se ei ruostu, pala eikä lahoa. Tiilet voidaan luokitella poltettuihin ja kalkkihiekkatiiliin. Riittävän puristuslujuuden ansiosta tiiliä voidaan käyttää sekä kantavissa että ei-kantavissa rakenteissa. Kalkkihiekkatiilet ovat erittäin mittatarkkoja, ja suuren tiheydensä ansiosta tiilien ääneneristävyys on hyvä. [15, 16]

Poltettu tiili on poltetu savesta, ja tiilimassaa on seostettu hiekalla. Julkisivutiilimassoihin on lisätty myös sahanpurua, joka palaa polton yhteydessä pois aiheuttaen tiileen suljettuja huokosia. Suljetun huokoisuuden ansiosta tiilellä on paremmat pakkasenkestävyysominaisuudet. Tiilen huokoisuusaste vaihtelee 10-50 tilavuus-% välillä. Tiilen vesi-

höyrynläpäisevyys on oleellisesti riippuvainen tiilen polttolämpötilasta. Poltetun tiilen tiheys, reikäisyysaste ja kosteuspitoisuus vaikuttavat tiilen lämmönjohtavuuteen, ja reikätiilellä on parempi lämmöneristävyys kuin reiättömällä tiilellä. [5]

Poltetut tiilet voidaan jakaa matala-, keski- ja korkeapolttoisiin tiiliin. Poltettujen tiilien ominaisuuksiin vaikuttaa polttoaste ja saven laatu. Matalapolttoiset tiilet ovat vaaleita ja käytettävissä puhtaaksimuurattuihin julkisivuihin. Keski- ja korkeapolttoisista tiilistä muuratut seinät sopivat tyypillisesti rappausalustoiksi. Korkealla polttoasteella saavutetaan pienempi huokoisuusaste, mutta huokoskoko on suurempi kuin pienemmän polttoasteen tiilillä. Kun polttolämpötila kasvaa, suurten huokosten prosentuaalinen osuus kasvaa, kun pienet huokokset yhdistyvät muodostaen suurempia huokosia. Suurin osa tiilen huokosista koostuu kapillaarihuokosista, minkä vuoksi tiilen vedenimunoisuus ja kosteudenjohtavuus ovat suuria. [5, 17]

Kalkkiahiekkatiilet on valmistettu kvartsipitoisesta hiekasta, sammuttamattomasta kalkista ja vedestä. Kalkkiahiekkatiilen valmistus eroaa poltetuista tiilistä, sillä polttamisen sijaan valmistusprosessi tapahtuu karkaisemalla tiilet höyryautoklaavissa. Autoklaavissa on korkea paine ja 160-200 °C lämpötila. Karkaisussa kalkki ja hiekan pinnasta liukeneva kvartsi reagoivat muodostaen kalsiumhydrosilikaattia. Karkaisun aikana kalkkiahiekkatiili saavuttaa lujutensa. Kalkkiahiekkatiilien huokoisuusaste on 10-20 tilavuus-% välillä. Huokokset ovat muodostuneet runkoaineiden väliin ilmaonteloiksi, joiden läpi kulkee levymäisiä ja neulamaisia kiteitä. Toisin kuin poltetuilla tiilillä pienten huokosten osuus on kalkkiahiekkatiilillä suuri, minkä vuoksi kalkkiahiekkatiilien kapillaarinen vedenimukyky on pieni ja hygroskooppinen tasapainokosteus suuri. Näin ollen kalkkiahiekkatiili imee kapillaarisesti hitaasti vettä. Verrattuna poltetuun tiileen kalkkiahiekkatiilen vesihöyrynläpäisevyys on huonompi, vaikka vesihöyrynläpäisevyys kasvaakin kosteuspitoisuuden noustessa. [5, 15]

Tiilen valmistustekniikka on kehittynyt, mutta tiili on säilyttänyt alkuperäiset ominaisuutensa. Tiilestä saadaan nykyään enemmän eri väri- ja pintavaihtoehtoja. Aikaisemmin tiilen valmistus on ollut käsityötä. Koneellisen valmistuksen myötä tiilen laatua ja mittatarkkuutta on saatu parannettua. Käsityönä valmistettujen tiilien ongelmana oli vaihtelevat mitat, kun jokainen tehdas valmisti tiiliä omien mittojensa mukaan. Julkisivujen muurauksessa saumat muurataan kerralla täyteen, ja jälkisaumausta tulisi välttää, jotta saavutetaan riittävän luja, tiivis ja säänkestävä saumaus. [9, 16, 18, 19]

Kuvassa 5 on esitetty tiiliverhottu julkisivu.



**Kuva 5.** *Tiiliverhottu julkisivu.*

Kuorimuureilla on suurempi lämpötilanvaihtelu ja pienempi kosteudenimukyky verrattuna massiivitiilimuuriin, minkä takia säärasitusolot ovat ankarammat kuorimuurin pinnalle. Tämä aiheuttaa muurauskivien ja laastin pakkasvaurioita enemmän kuorimuureihin kuin massiivitiiliseiniin. Kuorimuurin kestävyysongelmia ovat pakkasrasitus erityisesti korkeissa rakennuksissa, lämpö- ja kosteusliikkeet, mitkä aiheuttavat julkisivurakenteen halkeilua, sadeveden vuotaminen kuorimuurin läpi ja muurin saumoissa olevien teräsraudoitteiden korroosio. [10]

Koska 1940-60-luvun tiilirakenteisissa julkisivuissa ei tuuletusväliä ollut, oli ulkoseinärakenteen kuivuminen puutteellista. Lisäksi huokoinen sisäkuori oli usein epätiivis aiheuttaen ilmavuotoja rakenteen läpi. Sisäkuoren ilmatiiveys oli huono etenkin ikkunoiden ja oviaukkojen kohdilla. Vaikka tiileen kertyy kosteutta huokoisena materiaalina, kaikista kivipohjaisista rakennusmateriaaleista tiili on nopeimmin kuivuva [16]. Tiilellä on betonia huomattavasti pienempi kapillaarivastus, minkä vuoksi tiilen pinta pysyy kosteana pidempään kuin betonin pinta. Tiili on rakennusmateriaali, joka on lähes kuiva rakentamisen jälkeen. Betoni ei puolestaan ehdi kuivua rakentamisen aikana, vaan rakenteisiin jää kosteutta. Tarvittaessa tiilimuurirakenne joudutaan eristämään liialliselta kosteuden haihtumiselta, koska liian nopea saumauslaastin kuivuminen aiheuttaa laastin halkeilua. Laastin halkeilu johtaa muun muassa lujuuden ja tiiviiden heikentymiseen. [19, 20]

Tiili on riskitön rappausalusta, sillä tiilen mekaaniset ominaisuudet ovat hyvät ja karhean pinnan ansiosta rappaus saadaan varmasti tarttumaan tiileen. Lisäksi tiilen vedenimuoimaisuudet ovat sopivat rappausalustalle sekä tiilen kutistuminen on vähäistä. Tiiltä on lisäksi käytetty vuosittuhansia rakennusmateriaalina. Rappausalustana tiilen pinnan tulee

olla karhea ja vedenimukyvyyn 8-12 % luokkaa, jolloin saavutetaan mahdollisimman hyvä tartunta rappaukselle. [16, 21]

### 2.2.2 Halkeillut betoni

Betoni koostuu sementistä, vedestä ja runkoaineesta sekä lisä- ja seosaineista. Lisäaineita sekoitetaan betoniin haluttujen materiaaliominaisuuksien saavuttamiseksi. Runkoaineena voi olla luonnonkiviaineita tai keinotekoisia kiviaineita, esimerkiksi kevytsoraa, masuunikuonaa tai lentotuhkaa. Tiili ja muurauksessa käytettävät laastit ovat huokoisempia materiaaleja kuin betoni [22]. Betonilla on hyvä veden- ja kosteudenkestävyys, mutta betonin vanhenemisen myötä betonirakenteissa voi esiintyä halkeamia, mikä edesauttaa kosteuden siirtymistä rakenteiden läpi. Betonin kosteusominaisuudet ovat riippuvaisia betonin huokoisuusasteesta ja huokoskokojakaumasta. Betonin huokosrakenteeseen ja tiiveyteen vaikuttaa muun muassa betonin vesisementtisuhde, hydratoitumisaste, runkoaineen raekoko ja ilmamäärä betonissa. Hydratoitumisaste tarkoittaa veden kanssa reagoineen sementin määrää, minkä reaktiotuotteena syntyy sementtikiveä. [5]

Betonin lämmönjohtavuus on sitä parempi, mitä suurempi on betonin tiheys ja raudoitteiden määrä betonissa. Myös kosteus ja lämpötila vaikuttavat betonin lämmönjohtavuuteen. Betonilla on suuri ominaislämpökapasiteetti eli betonilla on kyky varastoida ja luovuttaa lämpöä, mitä voidaan hyödyntää rakennuksien lämmityksessä ja jäähtäytöksessä. Betonin vesihöyrynläpäisevyys on pieni, joten betoni voi toimia itsessään sekä höyryntäjä ilman sulkuna ilman erillistä vesihöyry- ja ilmansulkua. Betonin vesihöyrynläpäisevyyteen vaikuttaa muun muassa huokosrakenne, tiiveys, kosteus ja lämpötila. Jos betonisisäkuoressa esiintyy materiaalin vanhentumisen myötä halkeamia, sisäkuoren kyky estää kosteuden ja lämmön siirtymistä muuttuu. Vaikka betoni on tiivis rakennusmateriaali, halkeamien takia lämpö ja kosteus pääsevät siirtymään rakenteiden läpi. [5]

### 2.3 Julkisivurakenteiden toimivuuteen vaikuttavat tekijät

Julkisivurakenteen täytyy olla teknisesti ja visuaalisesti toimiva kokonaisuus, johon vaikuttavat valittu julkisivurakennetekniikka, käytetyt materiaalit, värit ja pintakäsittelymenetelmät. Julkisivurakennetta valittaessa on huomioitava julkisivurakenteen toimivuus, ulkonäkö, elinkaari, palonkestävyys, kuormat ja massa, huollettavuus, asennettavuus sekä ylläpito- ja rakennuskustannukset. [23, 24]

Julkisivurakenne on toimiva, kun julkisivu tuuletusväleineen kestää myrskysateen ja estää tuulen aiheuttamat haitalliset vaikutukset seinärakenteessa. Sen lisäksi seinän sisäosan sisäverhous, ilmansulku tai höyrynsulku liitoskohtineen tulee olla ilmanpitäviä, sisäosan tulee estää ilman vesihöyryä kulkeutuminen rakenteessa ja kosteiden tilojen veden haitallinen siirtyminen rakenteessa. Seinärakenteella täytyy olla kyky kuivua ja eristää lämpöä. Ulkoseinän lämpö- ja kosteusteknisessä tarkastelussa varmistetaan yhtenäinen läm-

möneristys, ilmatiiveys ja höyrynsulun toimivuus, ulkoverhouksen taustan tuuletus, rakenteen toimivuus viistosateella, liitokset ja julkisivumateriaalien vaihtumiskohtien toimivuus. [5, 25]

Julkisivurakenteiden toimivuutta heikentäviä tekijöitä on muun muassa betoniseinien vaurioituminen, joka tapahtuu tyypillisimmin rapautumalla, vesivuodoista tai terästen ruostumisvaurioista. Rapautumisen syyt ovat säänkestämätön materiaalivalinta tai liian pienet terästen peitepaksuudet betoniulkokuoressa. Uusittaessa betoniulkokuorta, tulee ottaa huomioon sisäkuoren kantavuudet pystysuuntaisista kuormista. Uusi ulkokuori voidaan tehdä muun muassa eristerapattuna, tuulettavana verhouksena, betonikuorina tai muurattuna rakenteena, mutta julkisivua korjattaessa ja suunniteltaessa tulee kuitenkin huomioida ääneneristävyyden heikentyminen. [25]

Tiiliseinissä esiintyvistä vaurioista tyypillisiä ovat vesivuodot tiilirakenteiden sisään tai jopa huonetilaan asti. Syynä voi olla muun muassa sadeveden pääsy rakenteiden sisään puutteellisten räystäiden vuoksi tai liian ohuen tiilen käyttö muurauksessa. Muuraus on voitu tehdä huolimattomasti, jolloin laastisaumat voivat olla vettä läpäiseviä, tiiliseinän takana ei ole tuuletusrakoa tai tuuletusrako on tukkeutunut laastista. Lisäksi välipohjarakenteiden kohdalla olevat palokatkot voivat ohjata veden rakenteiden sisään. Vesivuotojen vuoksi seinärakenne voi homehtua tai puurakenteiset seinät voivat lahota. Tiilipinnoilla esiintyvät suolasaostumat ovat myös seurausta rakenteissa olevasta kosteudesta. [8]

### 3. JULKISIVUN UUSIMISEN ERITYISPIIRTEET

Julkisivujen korjaustavat jaotellaan paikkaus- ja pinnoituskorjauksiin, peittäviin korjauksiin ja julkisivun purkamiseen ja uusimiseen kokonaan. Rakennuksen vanha julkisivu joudutaan purkamaan ulkokuoren osalta kokonaan, kun julkisivun vaurioituminen on edennyt niin pitkälle, ettei vanhaa julkisivua pystytä ankkuroimaan sisäkuoreen tai rakennuksen runkoon luotettavasti tai julkisivupintaan ei pystytä kiinnittämään uutta ohut- tai paksurappauseristettä. [26]

Julkisivukorjauksessa on huomioitava korjauksen tarpeellisuus, julkisivun ominaisuudet, laatuvaatimukset ja esteettisyys. Ulkoseinien lisälämmöneristäminen ei joka julkisivuun ole kannattava syy julkisivun korjaamiselle, vaikka lämmityskustannukset hieman pienevät. Julkisivun purkuun ja korjaamiseen voidaan päätyä esimerkiksi, kun julkisivussa on laajalti osin vaurioita ja sadevesi pääsee kulkeutumaan halkeamakohtista rakenteiden sisään. Julkisivurakenteen lämmöneristeen ulkopinnalle voi muodostua kosteusteknisten toimivuuspuutteiden seurauksena mikrobivaurioita ja haitallista homekasvustoa, mikä aiheuttaa myös julkisivun ulkokuoren ja lämmöneristeen purkamiseen ja uusimiseen [27]. [9]

Korjaussuunnittelussa on otettava huomioon julkisivun sisäkuoren mahdollinen oikaisu-tarve, sillä esimerkiksi tiili sisäkuorena muodostaa epätasaisen pinnan. Lisäksi on varmistettava ilmatiiveys ja rakennusakustinen toimivuus sekä julkisivun liittyminen sokkeleihin ja kiinnikkeiden poistaminen. [26]

#### 3.1 Julkisivukorjaustapojen jaottelu

Julkisivukorjaukset voidaan jakaa paikalliseen korjaukseen, peittävään korjaukseen ja purkavaan korjaukseen, jossa vanha julkisivu puretaan kokonaan. Paikallinen korjaus käsittää maali- ja pinnoituskorjaukset, peittävä korjaus tehdään vanhan julkisivurakenteen päälle ja julkisivun uusimisessa julkisivu puretaan sisäkuoreen asti ja tilalle asennetaan uusi julkisivurakenne. Tässä työssä keskitytään korjaustapauksiin, jossa julkisivu puretaan sisäkuoreen asti ja uusitaan kokonaan. [12]

Julkisivuja voidaan korjata paikkaus- ja pinnoitekorjauksilla, jos julkisivu on vaurioitunut paikallisesti. Julkisivun uusimisessa eri julkisivurakennevaihtoehdot luokitellaan purkaviin ja peittäviin korjausrakennetekniikoihin, jotka ovat vaihtoehtoina julkisivurakenteen ollessa laajemmin vaurioitunut. Myös muita korjaustoimia voidaan tehdä julkisivun kosteusrasituksen pienentämiseksi, esimerkiksi parvekelasituksilla, vedenpoistojärjestelmää parantamalla tai ulkonevia räystäitä rakentamalla. [12]

### 3.1.1 Julkisivun paikkaus- ja pinnoituskorjaukset

Julkisivun paikkaus- ja pinnoituskorjaus on säilyttävä korjaustapa. Vanhan rakenteen ominaisuuksia, rakennetta ja toimintatapaa ei oleellisesti muuteta paikkaus- ja pinnoituskorjauksessa. Usein paikallinen korjaustapa joudutaan hylkäämään ulkonäkövaatimusten takia. Esimerkiksi betonin paikkauskorjaukset erottuvat julkisivusta huolimatta huolellisesta paikkauksesta, ellei betonipaikkauksia ylitasoiteta. Ylitasoitusta ei voida kuitenkaan tehdä erityisille julkisivurakenteille. Jos rakenne on pesubetonia, ylitasoitus aiheuttaa julkisivun ulkonäön muuttumisen. Myös erilaisten pintatarvikkeiden, kuten tiili- ja klinkkerilaattojen, huono saatavuus vaikuttaa mahdollisuuteen käyttää paikkaus- tai pinnoituskorjausmenetelmää. [12]

Paikkaus- ja pinnoituskorjauksia ovat esimerkiksi saumauskorjaukset, betonin laastipaikkauskorjaukset ja julkisivun pintakäsittely suojaavalla pinnoitteella. Saumauskorjauksilla varmistetaan julkisivuelementtien tiiveys. Yleisin saumarakenne on elastisella saumamassalla tiivistetty sauma, mutta voidaan myös käyttää esimerkiksi paisuvaa saumanauhaa tai profiilinauhaa. Saumakorjauksessa vanha sauma poistetaan ja tilalle asennetaan uusi sauma. Vanhan sauman päälle ei voida laittaa uutta saumaa, koska uusi sauma repeäisi tällöin nopeasti vanhan sauman halkeamakohtalta. [12]

Julkisivua voidaan pintakäsitellä suojaavalla pinnoitteella. Julkisivun kosteusrasitustaso saadaan alennettua, kun sadevesi ei pääse imeytymään pinnoitteen läpi rakenteeseen. Vanha pintakäsittely poistetaan julkisivusta esimerkiksi hiekkapuhaltamalla, minkä jälkeen puhdas rakenne ylitasoitetaan ja pintakäsitellään suojaavalla pinnoitteella. Pintakäsittelyn yhteydessä voidaan tehdä myös saumojen uusiminen ja laastipaikkauksia näkyville vaurioille, kuten korroosiolle. Tiilipintaisissa julkisivuissa paikkauskorjauksessa vaurioituneet tiilet uusitaan, irtonaiset tiilet kiinnitetään uudelleen ja vaurioituneet saumat paikataan. Tiilen ja laastin vaurioitumisen syy on yleensä pakkasrapautuminen. [12]

### 3.1.2 Julkisivun peittävä korjaus

Julkisivun verhoukorpauksessa eli peittävässä korjauksessa vanhan vaurioitunut rakenne peitetään uudella pintarakenteella. Ulkoseinärakenteiden verhoukorpaukseen kuuluu ohessa myös seinärakenteen ulkopuolelle sijoitettava lisälämmöneristys. Betonijulkisivuun käytetään verhoukorpauksratkaisuna eristerappausta, levyverhousta, muurausta tai kuorielementtejä samoin kuin uudelleen verhouksratkaisuisakin. Verhoukorpaukset voidaan tehdä joko tuulettuvina tai tuulettumattomina rakenteina. Tuulettuvia rakenteita ovat levyverhoukset, muuraus ja betoniset kuorielementit, ja tuulettumattomia rakenteita ovat eristerappaukset. [12]

Kun vanha ulkoseinä peitetään uudella julkisivurakenteella, vanhan rakenteen vaurioituminen vähenee kosteusrasituksen alentumisen vaikutuksesta. Lisäksi lisälämmöneristyk-



sellä ja uudella verhousrakenteella saavutetaan lämpötilan nousun avulla alhaisempi kosteuspiitoisuus julkisivurakenteessa, mikä estää vaurioitumisen etenemisen. Peittävällä korjauksella sadevesi ei pääse kosketuksiin vanhan rakenteen kanssa, ja betonisissa rakenteissa kosteusrasituksen aleneminen pysäyttää terästen korroosioreaktion. [12]

Peittävä korjaustapa lisää julkisivurakenteen painoa, joten samalla on varmistettava vanhan rakenteen lujuuden säilyminen julkisivurakenteen vaurioitumisesta huolimatta. Vaurioitumisen takia vanhan seinärakenteen kiinnitysvarmuus on saattanut heikentyä, ja riittävän kiinnitysvarmuuden aikaansaamiseksi uuteen rakenteeseen voidaan tehdä lisäksi kiinnitykset läpipulttauksella, jota käytetään pääosin betonisandwich-elementtien kiinnityksen varmistamiseen. Läpipulttaus on helppo tehdä, koska pultit jäävät uuden seinärakenteen taakse näkymättömiin. Vanhan ulkokuoren kiinnitystä parannetaan usein pulttaamalla vanha ulkokuori verhoukorkorjauksen yhteydessä. Verhoukorkorjauksen yhteydessä suositellaan asennettavan myös ulkonevat räystäät, mitkä auttavat julkisivun kosteusrasituksen alenemistä. [12]

### 3.1.3 Julkisivun ulkokuoren purkaminen ja uusiminen

Seinärakenteen ulkokuoren kokonaan purkaminen on korjausvaihtoehtona, kun vaurioituminen on pitkällä eikä vanha julkisivupinta ole käyttökelpoinen uusien rakenteiden asentamiseen. Lisäksi lämmöneristeen ulkopinnassa olevat mikrobivauriot voivat olla syynä julkisivun purkamiseen sisäkuoreen asti. Kun vanha julkisivurakenne on huonokuntoinen, purkamiskustannukset eivät kasva liian suuriksi. Ulkokuoren purkamisratkaisuun päädytään myös, kun seinärakennetta ei voida paksuntaa nykyisestään. [8]

Kun julkisivu päädytään purkamaan sisäkuoreen asti, ulkoseinärakenteen ulkonäköä on mahdollista muuttaa eri julkisivurakennevaihtoehdoilla. Julkisivuun voidaan tehdä uloimmaksi kerrokseksi eristerappaus, tuulettuva verhousrakenne, kuorielementit tai uusia kuorimuuri [26]. Lisäksi tiilimuurattujen julkisivujen ulkonäköä voidaan muuttaa esimerkiksi eri tiilityypeillä käyttämällä poltettuja tiiliä, erikokoisia tiiliä tai muuttamalla tiilen väriä. Toinen vaihtoehto tiilimuurauksen muuttamiseen voidaan tehdä erilaisilla saumaratkaisuilla, kuten muuttamalla sauman paksuutta, tiililimitystä tai sauman viimeistelytekniikkaa. [19]

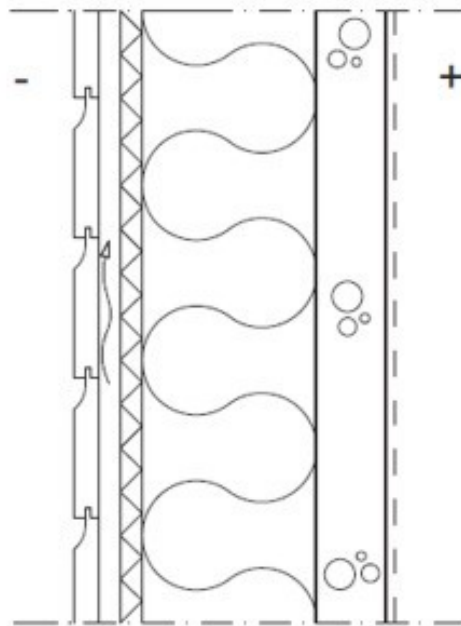
## 3.2 Julkisivuvaihtoehdot

Julkisivun uusimisessa julkisivurakennevaihtoehtoja ovat tuulettuvat ja tuulettumattomat rakenteet. Tuulettuvia rakenteita ovat erilaiset levyverhoukset, muuraus ja betoniset kuorielementit. Tuulettumattomista rakenteista on esimerkkinä eristerappaus. Sekä tuulettuvissa että tuulettumattomissa rakenteissa kosteutta siirtyy rakenteisiin usein liitoskohtien kautta, kuten ikkunoiden ja räystäiden liitoskohdista. Tuulettuvissa rakenteissa rakenteisiin lämmöneristeen ja ulkoverhouksen väliin kertynyt kosteus poistuu rakenteesta tuulettuvien kautta. Tuulettumattomissa rakenteissa julkisivurakenteen pinta tehdään tiiviiksi

ja yhtenäiseksi, jolloin vesivuotoja rakenteen sisälle ei pääse muodostumaan. Lämmöneristeen ylimääräinen kosteus pääsee poistumaan rakenteesta kuivumalla ulkopinnan läpi. Kosteusteknisesti toimivassa tuulettumattomassa eristerappausrakenteessa käytetään riittävän vesihöyrynläpäiseviä materiaaleja ja julkisivurakenteen sauma- ja liitoskohdat on oltava tiiviitä. Lisäksi rappauskerrosten kutistuminen sekä lämpö- ja kosteusliikkeet julkisivurakenteessa eivät saa aiheuttaa liian suuria halkeamia rappauksen pintaan. [12, 28]

### 3.2.1 Tuulettuva verhous

Tuulettuvassa julkisivurakenteessa julkisivun pintamateriaalin takana on yhtenäinen tuuletusväli, jonka tarkoituksena on parantaa rakenteen kuivumista ja kosteusteknisiä ominaisuuksia. Rakennuksen runko voi olla muun muassa tiilimuuri-, betonisandwichelementti- tai muurattu harkkorakenne. Kuvassa 6 on esitetty tuulettuva julkisivurakenne betonisäkuorella, kun vanha ulkokuori on purettu. [23]



**Kuva 6.** Tuulettuva julkisivurakenne [29].

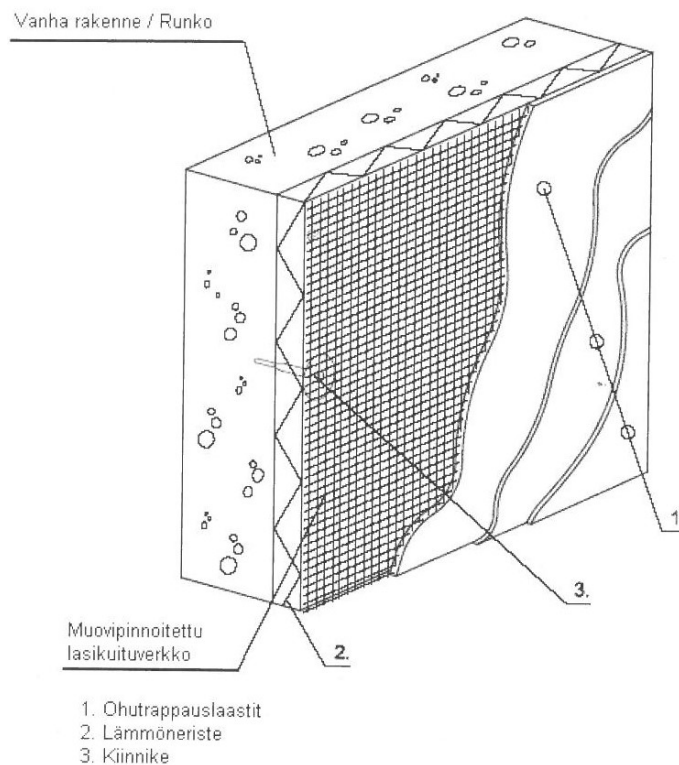
Tyypillinen esimerkki tuulettuva verhouskesta on tuulettuva levyrappausrakenne. Levyrappaus tehdään rappaamalla levyalustan päälle, ja levyverhous on kiinnitetty lämmöneristeen läpi runkorakenteeseen ranka- ja kiinnitysrakenteilla [23]. Levyn on oltava sääkestävä ja levyn lämpötilan- ja kosteusmuodonmuutosten on oltava pienet. Levyverhous lisää rakenteen painoa, joten vanhan rakenteen lujuus täytyy olla riittävä uuden verhousen asentamiselle [12]. Levyjen takana on yhtenäinen tuuletusväli. Tuulettuvaa levyrappausta voidaan käyttää myös kevyiden rankarakenteisten julkisivujen verhoiluina. [26]

### 3.2.2 Eristerappaus

Eristerappaus on pintarakenteeltaan yhtenäinen ja saumaton tuulettumaton rakenne. Eristerappaus tehdään asentamalla uusi lämmöneriste joko suoraan vanhan julkisivurakenteen päälle tai puretussa rakenteessa sisäkuoren ulkopintaan. Eristerapattuja kivirakenteisia ulkoseiniä ovat muun muassa betoni- ja tiilirakenteiset seinät, kevytbetoni-kevytsoraharkkoseinät ja solumuovieristeiset valuharkkoseinät. [12, 17, 26]

Rakenteen ulkooverhous muodostuu rappauspinnasta, kun eristeen ulkopintaan rapataan ohut- tai paksurappaus. Ohutrappaus on yleensä paksurappausta vesitiiviimpi. Tuulettumattomissa rakenteissa on tärkeää, että käytetyillä rakennusmateriaaleilla on riittävä vesihöyrynläpäisevyys. Ohutrappaus tehdään sementtilaasteilla, jota on seostettu polymeereillä. Polymeerien avulla rappauslaastin tartuntaa ja tiiveyttä saadaan parannettua. Lämmöneristeen ja rappauskerrosten riittävällä vesihöyrynläpäisevyydellä saavutetaan myös kosteusteknisesti toimiva julkisivurakenne. Kosteusteknisen toimivuuden kannalta on myös tärkeää, ettei rappauksen kutistuminen eikä lämpö- ja kosteusliikkeet aiheuta suuria halkeamia rakenteisiin. [12, 17]

Kuvassa 7 on esitetty ohutrappausrakenne.

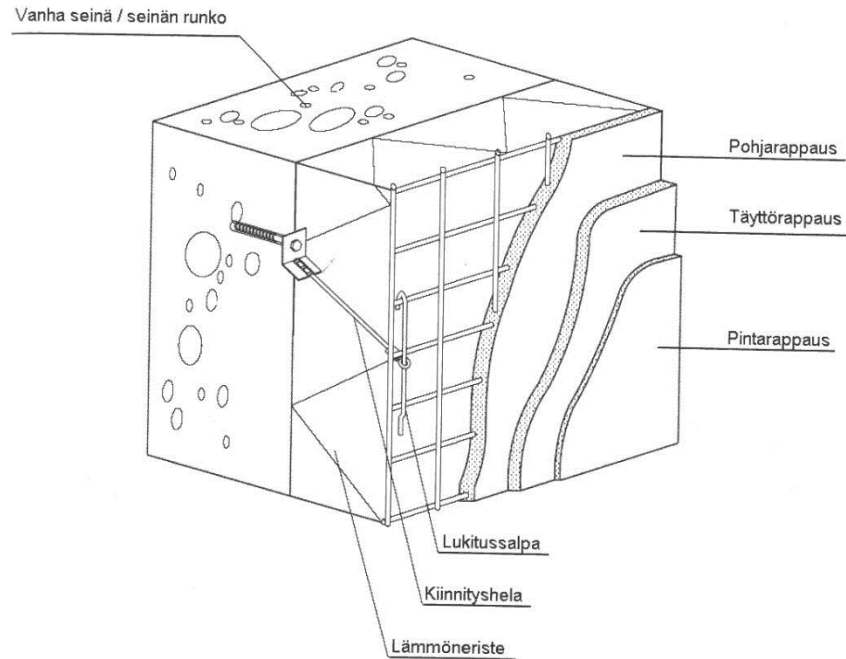


**Kuva 7.** Ohutrappausrakenne [17].

Ohutrappaus koostuu yhdellä tai kahdella laastilla tehdyistä rappauskerroksista. Lämmöneristeen päälle tehdään tartunta- tai pohjarappaus, ja uloimmaksi kerrokseksi pinta-rappaus. Vesitiiviimpi ohutrappaus on samalla vesihöyrytiiviimpi ja heikentää rakenteen

kuivumista. Alustan tulee olla kauttaaltaan riittävän luja, koska ohutrappauksessa lämmöneristeet kiinnitetään liimalaastin avulla alustaan. Yksittäiset vauriot eivät heikennä kiinnitysvarmuutta oleellisesti, mutta laajempien vauriokohtien riittävä lujuus on varmistettava. Julkisivun korjaaminen ohutrappauksella kasvattaa julkisivun painoa jonkin verran. [12, 17, 25]

Kuvassa 8 on esitetty paksurappausrakenne.



**Kuva 8.** Paksurappausrakenne [17].

Paksurappauksessa lämmöneristeiden päälle muodostetaan pohja-, täyttö- ja pintarappaukset. Paksurappaus tehdään kalkki- tai kalkkisementtillaasteilla. Vanhimmissa rakennuksissa rappausta on ollut kalkkilaastia, mutta myöhemmin rappaukseen on käytetty kalkkisementtillaasteja. Rapattujen julkisivujen pintakäsittelyyn on käytetty kalkki- tai kalkkisementtimaaleja. Eristerapauksissa julkisivuissa kosteuden siirtyminen rakenteesta täytyy suunnitella järjestämällä eristerappauksen alaosaan poistumisreitit rakenteeseen tiivistyneelle ylimääräiselle kosteudelle. Saumojen liitoskohdat tulee tiivistää elastisen tiivistysmassan avulla. [17, 25]

Eristerappauksen käyttöä ei suositella esimerkiksi korkeissa rakennuksissa tuulisilla paikoilla meren rannoilla. Eristerapauksella julkisivuilla räystäiden leveys tulisi olla vähintään 400 mm. Eristerappausrakenteissa lämmöneristeinä voidaan käyttää solumuovieristettä, jolloin eristeen sisäpuolella olevan kivirakenteen on päästävä kuivumaan ennen kuin rakenne pinnoitetaan vesihöyrytiiviillä kerroksella. Rakenne kuivuu hitaasti solumuovieristeestä ulospäin. [12, 25]

Kivirakenteisilla ulkoseinärakenteilla sisäkuoren ilmanvuotokohdat tiivistetään elastisen saumauksen avulla. Saumoihin, liitoksiin ja läpivientien kohtiin käytetään tiivistysmassaa tai polyuretaanivaahtoa. Harkkorakenteisilla ulkoseinärakenteilla ilmatiiveys varmistetaan saumojen saumauslaastilla ja pystysaumoissa lämmöneristekerrokseen tehdyillä ponttiratkaistuilla. Solumuovieristeisissä seinissä eristeen pinta pinnoitetaan tasoitteella riittävän ilmatiiviuden saavuttamiseksi. [25]

### 3.2.3 Kuorimuurin uusiminen

Julkisivumuuraus uusitaan kokonaan, jos julkisivutiili tai muurauslaasti on vaurioitunut laajalta alueelta, eikä pelkkä laastisaumojen uusiminen ole riittävä korjaus. Yleensä julkisivun mikrobi- ja kosteusongelmat ovat julkisivurakenteen lämmöneristeessä, mutta myös rungossa olevat mikrobi- ja kosteusongelmat saattavat myös johtaa kuorimuurin uusimiseen. Kuorimuri joudutaan uusimaan myös, jos julkisivussa käytettyjä tiiliä ei ole saatavilla paikallista korjausta varten ja julkisivun peittävä korjaus ei ole ulkonäkösyistä mahdollinen. [30]

Kuorimuurin uusimisessa vanhat rapautuneet tiilet poistetaan muurauslaasteineen ja uusitaan kokonaan. Purkamisen jälkeen arvioidaan lämmöneristeiden ja rakennuksen rungon kunto sekä uusitaan tarvittaessa lämmöneristeitä. Uusitun muurauksen toimivuus ei ole riippuvainen vanhan rakenteen kunnosta, mutta osittain uusituilla julkisivuilla vanhan rakenteen kunto määrittää korjauksen käyttöiän. Muurauksessa käytetään rasitusolosuhteisiin sopivia pakkasenkestäviä tiiliä ja muurauslaasteja. Kuorimuurin uusimisen yhteydessä muuraussiteitä joudutaan yleensä lisäämään tai uusimaan ja pellitykset ja vedenpoistojärjestelmä uusitaan. Kosteusrasitustason alentaminen on keskeinen kriteeri kuorimuurirakenteen uusimisessa. Kuorimuurirakenteen uusimisessa julkisivurakenteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta alennetaan suojaavilla pellityksillä ja parantamalla vedenpoistoa rakenteista. [12, 30]

Kuorimuurirakenne kasvattaa ulkoseinän paksuutta suhteellisen paljon, kun rakenteen paksuus kasvaa tuuletusvälin ja lisälämmöneristämisen takia. Rakenteen paksuuden kasvamisen takia verhoukorkorjaus muuraamalla soveltuu parhaiten ikkunattomien päätyseinien verhoukseen. Kuorimuurikorjaukset soveltuvat sen lisäksi korjauksiin, joissa myös ikkunat uusitaan siirtämällä samalla ikkunoiden ulkopintaa ulkonäkösyistä lähemmäs julkisivun ulkopintaa. Suuren painon takia kuorimuurikorjaus vaatii yleensä myös erillisen perustuksen tai toisena vaihtoehtona tiilimuri voidaan kiinnittää vanhaan rakenteeseen. Kuorimuri kiinnitetään seinärakenteeseen muuraussiteiden avulla. Muuraussiteitä on käytetty esimerkiksi kupari- tai messinkilankoja tai bitumoituja tai sinkittyjä teräslankoja. Maaperän heikko kantavuus voi heikentää kuorimuurikorjaustavan mahdollisuutta julkisivujen korjausvaihtoehtoa valittaessa. [12]

### 3.2.4 Kuorielementit

Kuorielementtien käyttö julkisivukorjauksessa on harvinainen vaihtoehto, ja kuorielementtejä käytetään erikoiskohteissa, joissa on erityisvaatimuksia esimerkiksi elementtijaon säilyttämiseksi. Kuorielementit kasvattavat melko paljon julkisivurakenteen paksuutta kuorimuurin tavoin. Kuorielementtien paksuus on noin 50-120 mm, jonka lisäksi rakenteessa on 30 mm tuuletusväli ja lisälämmöneristys. Kuten kuorimuurin tapauksessa myös kuorielementtien käyttö soveltuu parhaiten ikkunattomien päätyseinien korjaamiseen. [12]

Kuorielementit painavat paljon, ja ripustettavien kuorielementtien käyttö edellyttää vanhalta rakenteelta riittävää lujuutta, jotta painavat kuorielementit saadaan kiinnitettyä vanhaan rakenteeseen. Julkisivurakenteiden korjaamisessa on myös mahdollista käyttää itsekantavia kuorielementtejä, joita varten tehdään erillinen perustus. Heikko maaperän kantavuus voi kuitenkin estää itsekantavien kuorielementtien käytön. Itsekantavat elementit eivät kuitenkaan lisää vanhan rakenteen kuormitusta merkittävästi. [12]

## 3.3 Sisäkuoren vaikutus julkisivun uusimiseen

Vaikka julkisivurakennetta uusittaessa julkisivu puretaan sisäkuoreen asti ja vanha sisäkuori säilytetään, täytyy sisäkuoren kunto ottaa myös huomioon julkisivun korjauksessa. Sisäkuori on usein pinnaltaan epätasainen, jolloin pinta täytyy suoristaa ennen uuden julkisivun asentamista. Sisäkuoreessa voi olla myös halkeamia ja epätiivelyskohtia, jotka suurissa määrissä alkaa vaikuttaa julkisivurakenteen rakennusfysikaaliseen ja -akustiseen käyttäytymiseen. Sisäkuoren oikaisu rappaamalla parantaa myös rakenteen ilmatiiveyttä. Suuret ilmapuotokohdat ja halkeamat täytyy tiivistää ja tukkia, ja sisäkuoren eri materiaaliominaisuudet vaikuttavat korjaustavan valintaan. [31]

### 3.3.1 Julkisivun oikaisutarve

Vanhoja julkisivuja purettaessa sisäkuoren pinta voi olla epätasainen, jolloin pintaa ei voida sellaisenaan käyttää uuden julkisivurakenteen pohjaksi. Korjausrakentamisessa tulee kiinnittää huomiota alustan suoruuteen jo rakennesuunnitteluvaiheessa. Julkisivun sisäkuoren ulkopinnan tai kuorimuurin takana olevan alusrakenteen pinnan suoruutta pystytään arvioimaan vasta ulkokuoren purkamisen jälkeen. Yleensä sisäkuoren pinta on epätasainen ja vaatii oikaisua ennen uuden julkisivun rakentamista. [23, 26]

Sisäkuoren suoruusvaatimus voidaan soveltaa uudisrakentamisen rappauspinnan luokan 3 tasaisuusvaatimuksesta, mikä on  $\pm 7$  mm. Sisäkuoren ulkopinnan suurimmat epätasaisuudet poistetaan piikkauksen avulla. Sen jälkeen epätasaisuuksia voidaan oikaista joko piikkaamalla tai mekaanisilla menetelmillä, kuten tasoite- ja rappauslaasteilla, ruisku-betonoinnilla, betonivalulla tai mineraalivillan avulla päälle tehtävien rappausjärjestelmän vaatimusten mukaan. [23, 26]

Julkisivu voidaan uusia muun muassa rappauksella, joka voidaan tehdä ohut- tai paksurappaus-eristejärjestelmällä. Ohutrappauksessa ongelmaksi voi muodostua sisäkuoren epätasainen pinta, ja ennen rappausta sisäkuoren ulkopintaa joudutaan tasoittamaan. Pehmeä mineraalivilla ei sovi mittapoikkeamien tasoitukseen ohutrappauksessa. Ennen tasoitusta julkisivun vanhat kiinnitysteräksset on poistettava, ja sisäkuoren ulkopinta puhdistettava vanhoista lämmöneristeistä, jotta uusien lämmöneristeiden liimakiinnitys on riittävän luja. Vanhat lämmöneristeet puhdistetaan mekaanisesti harjaamalla tai hiekka-puhaltamalla. PainePesua tai muita sisäkuorta kastelevia menetelmiä ei voida käyttää, koska vesi jää rakenteisiin aiheuttaen myöhemmin mahdollisesti rakenteiden kosteusvaurioita. Lopuksi sisäkuoren ulkopinta tasoitetaan riippuen tasoitustarpeesta joko riittävän lujalla tasoitus- tai rappauslaastilla tai ruiskubetonoimalla pinta tasaiseksi. Useissa tuulettuvissa julkisivurakenteissa voidaan käyttää säätökiinnikkeitä alustan pinnan epätasaisuuksien suoristamiseen [23]. Taulukossa 1 on esitetty sisäkuoren oikaisuun käytetyt epätasaisuuden suuruudesta riippuvat tasoitusvaihtoehdot. [26]

*Taulukko 1. Eri laastityyppien käyttö sisäkuoren epäsuoruuksien tasauksessa [23, 26].*

Sisäkuoren epätasaisuus (mm)	<10	10-20	20-40
<b>oikaisulaasti</b>	x		
<b>rappauslaasti</b>		x	x
<b>ruiskubetonointi</b>		x	x
<b>rankarakenteet</b>		x	
<b>betonivalu</b>			x
<b>säätökiinnikkeet</b>	x	x	x

Eri laastityyppi valitaan sisäkuoren epätasaisuuden mukaan. Jos epätasaisuuserot ovat alle 10 mm luokkaa, soveltuu sisäkuoren pinnan oikaisuun parhaiten oikaisulaasti. Rappauslaastia ja ruiskubetonointia käytetään tätä suurempien mittapoikkeamien tapauksessa. Rankarakenteita voidaan käyttää 10-20 mm paksuisilla epätasaisuuksilla ja betonivalu soveltuu kaikkein suurimpien epätasaisuuksien oikaisuun. Säätökiinnikkeitä voidaan käyttää kaiken paksuisten epätasaisuuksien oikaisuun, mutta nekin ovat käyttökelpoisia vain tiettyyn rajaan asti. Mikäli rankarakenteet ja runkokiinnikkeiden alle sovitettavia korokepalat soveltuvat osaksi korjattavaa julkisivurakennetta, voidaan niitä käyttää julkisivun sisäpinnan epätasaisuuksien suoristamiseen. Runkokiinnikkeillä ja rankojen korokepaloilla voidaan epätasaisuuksia oikaista noin 30 mm epätasaisuuksiin asti. [23, 26]

Paksurappaus-eristejärjestelmä soveltuu ohutrappausta paremmin epätasaisille sisäkuoripinnoille. Paksurappaus-eristejärjestelmän avulla pieniä sisäkuoren pinnan mittapoikkeamia pystytään tasaamaan rappauskerroksilla. Kun julkisivu puretaan lämmöneristeen, on uusituissa julkisivussa lämmöneristeen kerrospaksuus suurempi kuin lisälämmöneristyskorjauksissa. Lämmöneristeeksi voidaan käyttää jäykkiä mineraalivilloja, ja pehmeät mineraalivillat soveltuvat ainoastaan sisäkuoren pinnan suurempien mittapoikkeaminen tasoituksessa. Pienemmän mittapoikkeamat tasataan pehmeän ja kovan mineraalivillan yhdistelmällä. Pehmeä lämmöneriste on painettava tiiviisti sisäkuoren pintaa vasten, sillä liiallinen eristeen painuminen voi aiheuttaa koko rappauksen kasaan painumisen. Mineraalivillan painamiseen voidaan käyttää villakiinnikkeitä, joiden avulla villa saadaan riittävän tiiviisti kiinni alustaan. [26]

### 3.3.2 Sisäkuoren halkeamat

Julkisivurakenteissa halkeilu voi heikentää rakenteen kantavuutta ja säilyvyyttä. Rakenteen taivutus- ja leikkauskestävyys heikkenee, jos siinä esiintyy suuria halkeamia. Halkeamien kautta rakenteeseen kulkeutuu ilman mukana myös kosteutta ja epäpuhtauksia. Betonirakenteiden tapauksessa halkeamat voidaan jakaa rakenteelliseen halkeiluun, vaurioitumisesta johtuvaan halkeiluun ja pinnan verkkohalkeiluun. Rakenteellisen halkeilun syynä on puutteellinen kantavuus, ylikuormitus tai pakkovoimat. Vaurioitumisesta johtuvaan halkeiluun on syynä yleensä raudotteiden korroosio tai betonin rapautuminen. Pinnan verkkohalkeilussa halkeamat ovat seurausta betonin kutistumisreaktiosta. Tiilimuurin voi syntyä halkeamia esimerkiksi rakenteen painumisen seurauksena. [31]

Halkeamakorjausmenetelmiä ovat injektointi, imeyttäminen, pinnoittaminen, halkeaman avaaminen ja laastipaikkaus sekä halkeamien muuttaminen liikuntasaumoiksi. Sisäkuoreissa olevia halkeamia pystytään korjaamaan esimerkiksi pinnoittamalla julkisivun purkamisen ja uusimisen yhteydessä. Ehjän julkisivun tapauksessa sisäkuoreissa olevia halkeamia voidaan korjata muun muassa injektoimalla, kittauksella tai teippauksen avulla. [31]

Halkeamakorjauksen tavoitteena voi olla halkeaman tukkiminen tai halkeamien korjaaminen voimia välittäväksi, jolloin injektoimalla halkeamakorjauksen myötä rakenne pystyy ottamaan vastaan kuormaa. Injektoinnilla tarkoitetaan halkeaman täyttämistä neste-mäisellä aineella, jolloin halkeaman tyhjä tila täyttyy ja injektointiaine kovettuu osaksi pysyvää rakennetta. Injektoinnin avulla voidaan korjata 0,2 mm leveämpiä halkeamia, ja alle 0,2 mm halkeamien korjaukseen käytetään muita halkeamakorjausmenetelmiä. Injektointi ei ole soveltuva halkeamakorjausmenetelmä, jos halkeilun syynä on esimerkiksi betonin pakkasrapautuminen tai raudotteiden korroosio. [31]

Parhaiten injektointiin sopivia materiaaleja ovat kovettuneet muovit tai sementtilaastit. Muoveista injektointiin käytetään polyuretaania ja epoksia sekä sementtilaasteista se-



menttiä, hienosementtiä tai mikrosegmenttiä, mutta yleensä injektointiin valitaan muovimateriaali. Ennen injektointia halkeaman pinta suljetaan esimerkiksi muovipohjaisen kittin avulla, jotta injektointimateriaali pysyy halkeamassa ennen lopullista kovettumista. Injektointi ei sovellu korjausvaihtoehdoksi, jos rakenteen halkeamat ovat rakenteen vaurioitumisesta aiheutuneita. [31]

Liikkumattomat halkeamat, jotka ovat muodostuneet esimerkiksi kuivumiskutistumisen seurauksena, voidaan halkeama korjata avaamalla ja täyttämällä sopivalla korjauslaastilla. Korjauksen yhteydessä rakenne joudutaan usein myös pinnoittamaan ulkonäkösyistä. Halkeamaa on suositeltavaa avartaa noin 15 mm levyiseksi rakenteen pinnasta, ja halkeaman syvyys tulisi olla 1,5-kertainen sen leveyteen nähden. Halkeaman avartamiseen käytetään yleensä mekaanista piikkausta. Laastipaikkaus soveltuu paikallisten ja vähäisten vaurioiden korjaamiseen. [31]

Lähinnä plastisesta eli pysyvästä muodonmuutoksesta aiheutuvia rakenteen yläpinnassa olevia halkeamia voidaan tiivistää imeyttämällä. Imeyttämisessä matalaviskoosista muovia täytetään kapillaarisesti ja painovoiman avulla halkeamiin, jossa muovi kovettuu ja tiivistää ilmavuotokohtat. Imeytystä voidaan käyttää lähinnä pinnassa oleviin halkeamiin. Imeytyksellä ei ole rakenteellista vaikutusta, eikä imeytys ole soveltuva halkeamien korjausmenetelmä, jos halkeamat ovat seurausta rakenteellisesta vaurioitumisesta. Halkeamien haitallisuus ja sen mukaan määräytyvä korjaustarve riippuvat useista tekijöistä, kuten halkeamien sijainnista, leveydestä, syvyydestä ja liikkuvuudesta, pinnan kosteus- ja tiiveysvaatimuksista ja betonin pakkaskestävyydestä. [31]

## 4. ILMAÄNENERISTÄVYYS JULKISIVURAKENTEISSA

Akustisen suunnittelun perustana on melun vaikutus ihmisiin ja lähtökohtana on melun poistaminen tai vaimentaminen. Melu on ei-toivottua ääntä, ja ääni on ilmanpaineessa tapahtuvaa vaihtelua suhteutettuna staattiseen ilmanpaineeseen. Ääni luokitellaan meluksi, jos se häiritsee ihmisen toimintaa tai on haitallisen voimakasta. Ääntä ei luokitella meluksi ainoastaan äänenvoimakkuuden perusteella, vaan ääniympäristön kokeminen meluksi on subjektiivista ja eri ihmiset kokevat ääniympäristön eri tavoin. Vaikka melu ei aiheuttaisi terveyshaittaa, se vähentää viihtyisyyttä. [32]

Akustiikan osalta tässä työssä tarkastellaan ilmaääneneristävyttä julkisivurakenteissa, julkisivuun kohdistuvia ilmaääneneristävyysvaatimuksia ja ilmaääneneristävyuden laskennallista tarkastelua.

### 4.1 Julkisivun ääneneristysvaatimukset

Julkisivun ääneneristyksen tehtävänä on estää äänen siirtyminen tilojen välillä. Äänieristys ei saa huonontua korjatuissa julkisivurakenteissa. Ulkoseinien tehtävä on myös vaimentaa ulkoa tuleva melu, mikä on pääasiassa ilmaääntä. Tieliikennemelu on esimerkiksi pienitaajuisista, ja julkisivurakenteet eristävät paremmin korkeataajuisista ääntä verrattuna matalampitaajuisempiin ääniin. [32, 33]

Seinärakenteiden tehtävänä on myös eristää tilat toisistaan, ja rakenteet tulee suunnitella eristävyysominaisuuksiltaan riittäviksi, jotta seinärakenteiden ilmaääneneristävyys ei jää liian alhaiseksi. Rakennusta suunniteltaessa on huomioitava runko- ja askeläänieristävyys sekä seinien riittävä ilmaääneneristävyys, mihin voidaan vaikuttaa sopivien rakennusmateriaalien valinnalla. Lisäksi on huomioitava sopiva huonetilan jälkikaiunta-aika. Eri tilojen välille vaaditut ilmaääneneristävyuden arvot on esitetty Ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä. Asetuksen mukaiset vaaditut ilma- ja askelääneneristävyysarvot uudelle rakennukselle on esitetty taulukossa 2. Lukuarvot ovat asuntojen sekä majoitus- ja potilashuoneiden ilma- ja askelääneneristävyuden akustiseen suunniteluun.

**Taulukko 2.** Ilma- ja askelääneneristävyyden pienimmät ja suurimmat äänitasoeroluvut [1].

Huonetila	Pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ (dB)	Suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ (dB)
Asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilashuoneeseen	39	63

Asetuksen arvot ovat vaatimuksia uuden rakennuksen ääneneristykselle. Vanhassa rakennuksessa ääneneristävyys on usein heikompi, eikä uuden rakennuksen vaaditut ääneneristävyydsarvot ole samoja kuin korjatulle rakennukselle. Korjausrakentamisessa ääneneristävyys ei saa heiketä entisestään, mutta vanhan rakenteen ääneneristävyys ei usein yllä uuden rakennuksen ääneneristävyydsarvojen tasolle. [1, 15]

Ympäristöministeriön rakennuksen ääniympäristön asetuksen mukaan ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa on suunniteltava ja rakennettava siten, että rakennukseen kohdistuva melu pysyy riittävän alhaisena [1]. Melulle altistuvien ihmisten terveys ei saa vaarantua ja rakennuksessa olevien ihmisten täytyy voida nukkua, levätä ja työskennellä ilman liian korkeaa melutasoa. Rakentamismääräyskokoelmassa ei ole annettua tiettyä mitattua arvoa, mikä ulkovaipan ilmaääneneristävyys saisi korkeintaan olla, mutta asemat tai rakennuskaavoissa voi olla vaatimuksia ilmaääneneristävyydsarvoille. Vaatimukset voivat koskea esimerkiksi lentomelualueita tai vilkkaasti liikennöityä väyliä, kuten moottoriteitä. Tällaisissa tapauksissa korjatun kohteen ulkoseinä, ulkovaippa ja muut uusitut rakennusosat täyttävät sille asetetut vaatimukset. [26]

## 4.2 Ilmaääneneristys

Ääneneristävyyttä tarkastellaan ilma- ja askelääneneristävyytenä. Julkisivurakenteissa ilmaääneneristävyys on askelääneneristävyyttä tärkeämpi tekijä äänen kulkeutumisessa rakenteiden läpi. Ilmaääneneristyksen tarkoituksena on vähentää äänitehon siirtymistä tilojen välillä. Ääni voi siirtyä rakenteen läpi tiloja erottavan rakenteen kautta, tiloja erottavaa rakennetta sivuavien rakenteiden kautta sivutiesiirtymänä tai muita reittejä, kuten LVIS-järjestelmiä pitkin. Sivutiesiirtymä tarkoittaa äänen siirtymistä muuta kuin suoraa tilojen erottavan rakenteen kautta siirtyvää ääntä. Ilmaääneneristävyys  $R$  on rakenteeseen kohdistuvan ja rakenteen toiselle puolelle rakenteen välityksellä siirtyneen äänitehojen suhde

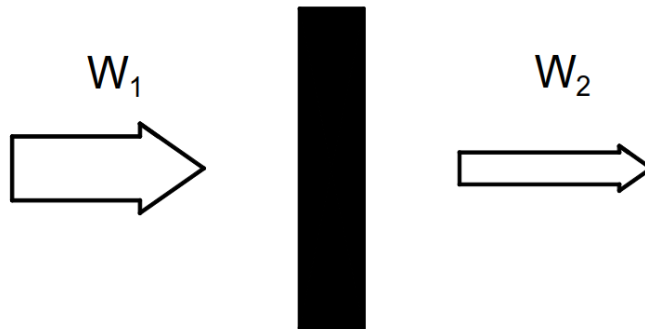
desibeleissä. Rakennusosan ilmaääneneristävyyys määritetään laboratorio-olosuhteissa äänenpainetasoon perustuvilla mittauksilla. [32, 34]

#### 4.2.1 Ilmaääneneristävyyden määrittäminen

Ilmaääneneristävyyys  $R$  määritellään rakenteeseen kohdistuvan ja rakenteen toiselle puolen rakenteen välityksellä siirtyneen äänitehojen suhteella desibeleissä. Ilmaääneneristävyyys on esitetty kaavassa 1 ja kuvassa 9 on esitetty rakenteeseen kohdistuvan äänitehon  $W_1$  ja rakenteen toiselle puolelle siirtynyt ääniteho  $W_2$  [35].

$$R = -10 \log \frac{W_2}{W_1} \quad (1)$$

$W_1$  on rakenteeseen kohdistuva ääniteho,  $W_2$  on rakenteen läpi toiselle puolelle siirtynyt ääniteho ja  $R$  on ilmaääneneristysluku desibeleissä. [34, 36]



**Kuva 9.** Rakenteeseen kohdistunut ja rakenteen läpi kulkeutunut ääniteho [37].

Massalain mukaan ilmaääneneristävyyys  $R$  on riippuvainen rakenteen pintamassasta  $m'$  ja taajuudesta  $f$ . Ilmaääneneristävyyys kasvaa 6dB, kun rakenteen pintamassa tai taajuus kaksinkertaistuu, koska ilmaääneneristävyyden desibeliasteikko on logaritminen. Koska rakenteeseen kohdistuvan ja heijastuvan äänitehojen suhteen arvot ovat hyvin pieniä, on ääneneristävyyys sovittu logaritmiseksi asteikoksi. [32]

Ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat rakenteen paino, kerrosten määrä, reiät, tiiveys ja rakennusosan liittyminen muihin rakenteisiin. Yksinkertaisilla rakenteilla ilmaääneneristysluku on riippuvainen pääasiassa rakenteen neliöpainosta ja tiiviyydestä, kun taas monikerroksellisilla rakenteilla ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat myös rakennekerrosten jäykkyys, kerrosten etäisyydet, väliaine ja kerrosten liittyminen muihin rakenteisiin. Monikerrosrakenteilla saavutetaan rakenteen massasta riippumatta yksinkertaisia rakenteita parempi ilmaääneneristävyyys. [34]

Ääneneristävyydsarvot tulisi tarkistaa julkisivukorjauksen yhteydessä ääneneristysmittauksien avulla, arvioimalla aikaisemmista mittaustuloksista tai laskennallisesti [9]. Koska rakennuksissa ääni siirtyy rakenteiden läpi osin sivuavia rakenteita, kuten vesi- ja

lämpöpatteristoputkia, pitkin, yksittäisten seinärakenteiden tarkkaa ilmaääneneristävyyttä on hankala määrittää. Rakennuksesta mitattu ilmaääneneristävyyssarvo on siis rakennusosan ja sitä ympäröivien sivuavien reittien yhteisvaikutus. [33]

Koska ilmaääneneristysarvot eroavat laboratoriossa saaduista mittaustuloksista, rakennuksille annettavat määräykset koskien ilmaääneneristyslukuja ilmoitetaan valmiin rakennuksen mittauseroina. Ilmaääneneristävyyttä voidaan arvioida myös laskennallisesti, jos rakenne on riittävän yksinkertainen. Tällöin laskennan avulla saadaan riittävän lähelle todellisuutta olevia ilmaääneneristävyyssarvoja. Monimutkaisilla rakenteilla luotettavan laskentatuloksen saaminen ja sen arviointiprosessi ovat työläitä. Kaikki ääneneristävyyteen liittyvät määräykset perustuvat mittaustuloksiin. [33]

## 4.2.2 Ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät

Sivutiesiirtymän takia ilmaääneneristävyys mitatussa tilassa on hieman heikompi kuin ainoastaan suoraan rakenteen läpi mitattu ilmaääneneristysluku. Sivutiesiirtymää voi tapahtua esimerkiksi erilaisten ilmanvaihtoputkien tai monikerrosrakenteilla kantavan rakenteen läpi menevien puisten palkkien kautta. Korjatessa vanhaa julkisivurakennetta täytyy huomioida sivutiesiirtymät ja varmistaa, ettei ääneneristävyys heikkene julkisivun korjaamisen jälkeen. [34]

Rakennuksen vaipan ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat tarkasteltavan huoneen tilavuus, julkisivun pinta-ala, julkisivumateriaalit ja julkisivuun kuuluvat rakennusosat. Ulkoseinän ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat puolestaan rakenteen massa, ominaistajuus ja ulkoseinän ilmatiiveys. Ääntä absorboivia materiaaleja ja lämmöneristeitä käyttämällä saadaan myös ilmaääneneristävyyttä parannettua [23]. Paras ilmaääneneristävyys saavutetaan ohuilla ja jäykillä tai painavilla ja tiiviillä rakenteilla. Painavia levyjä ovat esimerkiksi tiili ja betoni, ja ohuita ja jykkiä rakennuslevyjä lastulevy tai kipsikartonkilevy. [26, 32, 34]

Betonisandwich-elementeillä rakenteen ulkokuoren poistaminen vähentää julkisivurakenteen massaa aiheuttaen ulkoseinän ääneneristävyyden heikentymistä. Ilmaääneneristävyys heikkenee suhteessa enemmän ohuilla julkisivurakenteilla, jotka eivät ole kantavia, koska sisäkuori saattaa olla hyvin ohut ja suuri osa rakenteen massasta häviää purkamisen myötä. Kantavilla rakenteilla sisäkuoren paksuus on yleensä 150 mm, mikä on riittävä rakennuskustannuksien kannalta. Ohuilla sisäkuorilla rakenteen akustisia ominaisuuksia saadaan parannettua kasvattamalla rakenteen massaa, joka voidaan tehdä esimerkiksi paksuntamalla seinärakennetta ruiskubetonoinnin avulla. Samalla voidaan oikaista rakennuksen sisäkuoren ulkopintaa ja parantaa vaipan ilmatiiveyttä. Lämmöneristeiden ja rappauksen valinnalla pystytään lisäksi vaikuttamaan koko julkisivurakenteen ilmaääneneristävyyteen. [26]

Betonielementtirakennuksissa ikkunoiden ilmaääneneristävyyttä parantamalla voidaan vaikuttaa koko julkisivurakenteen ilmaääneneristävyyteen. Vaikka julkisivun seinärakenteen ilmaääneneristävyys heikentyisi, saadaan ikkunoiden uusimisella kompensoitua rakennusakustisia ominaisuuksia. Ilmaääneneristävyyden parantaminen ikkunoiden uusimisen myötä ei ole suoraan verrannollinen, vaan on riippuvainen ikkunoiden pinta-alojen suhteesta koko julkisivun pinta-alaan. Betonielementtirakennuksissa ikkunoiden osuus koko julkisivurakenteesta on kuitenkin huomattava, ja uusien ikkunoiden ilmaääneneristävyys voi olla jopa 10 dB vanhoja ikkunoita parempi. Asuinkerrostaloissa usein ikkunoiden uusimisen kautta saavutettu julkisivun parempi ilmaääneneristävyyden ja lämmöneristävyyden on kustannustehokkaampaa verrattuna julkisivun rakennusakustisten ominaisuuksien korjaamiseen. Sandwich-elementtien päälle tehtävä rappauserkerros saattaa myös heikentää rakennusakustisia ominaisuuksia varsinkin liikennemelun suhteen, jos rajataajuudet osuvat samalle alueelle. [26]

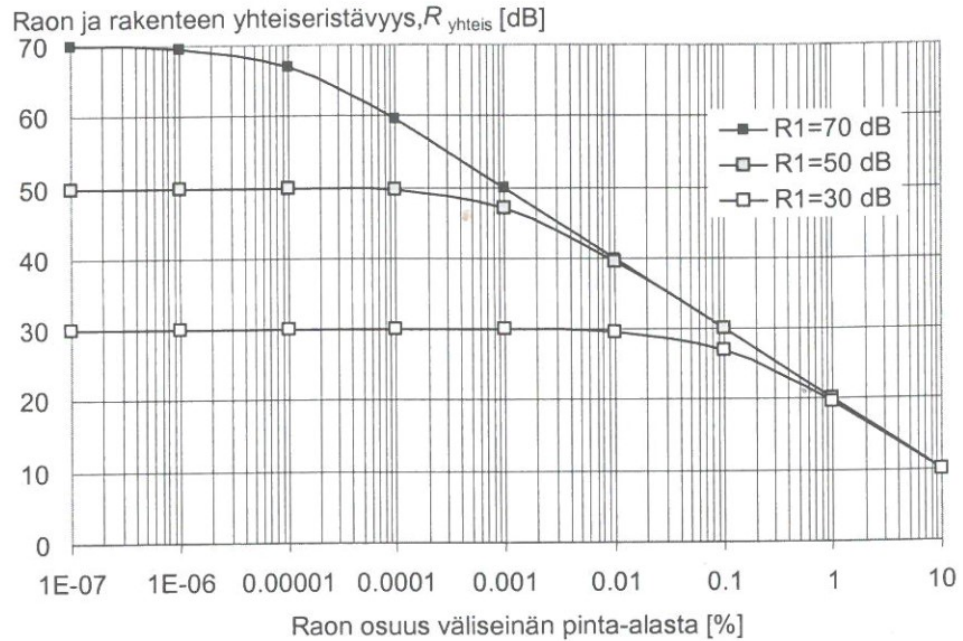
Ääneneristävyys heikkenee, kun ilmassa ja julkisivulevyssä olevat ääniaaltojen vaiheet ovat samat. Tällöin julkisivulevy ei muodosta juuri mitään estettä ääniaaltojen etenemiselle, mikä aiheuttaa ääneneristävyyden heikkenemisen. Tätä ilmiötä kutsutaan koinsidenssi-ilmiöksi, ja julkisivurakenteita suunniteltaessa tulee huomioida koinsidenssitäajuuudet riittävän ääneneristävyyden takaamiseksi. Koinssidenssin rajataajuus on koinsidenssi-ilmiön alin taajuus. Koinssidenssi heikkenee taajuuden kasvaessa ja ääneneristys kasvaa lineaarisesti koinsidenssin yläpuolella olevilla taajuuksilla. [32]

### 4.2.3 Rakojen vaikutus ilmaääneneristävyyteen

Julkisivurakenteiden täytyy olla tiiviitä, jotta vaadittu ilmaääneneristävyyssarvo voidaan saavuttaa. Rakenteiden laboratoriotestaukset tehdään ideaalitulanteissa, jolloin ilmavuotoja esimerkiksi halkeamien kautta ei huomioida vaan rakenne oletetaan tiiviiksi. Käytännössä rakenteissa on ilmavuotoja esimerkiksi rakenteiden nurkkien, halkeamien tai rakojen kautta. Suurimmat ilmavuodot tulevat kuitenkin ovien ja ikkunoiden liitoskohdista. [32]

Rakojen vaikutus ilmaääneneristävyyteen on suurimmillaan, kun tiiviin rakenteen ilmaääneneristävyys on korkea. Raon ääneneristävyys riippuu taajuudesta. Ilmaääneneristävyys raossa on nollaa suurempi ja tyypillisesti 5-10 dB suurimmalla osalla taajuusalueista. Raon ilmaääneneristävyys voi olla myös negatiivinen, mikä ei kuitenkaan tarkoita äänen kasvua. Tietyllä resonanssitäajuuudella rako imee itseensä ääntä suuremmalta alueelta kuin mikä on raon poikkipinta-ala, ja resonanssi voimistaa ääntä entisestään. [32]

Jotta rakojen vaikutus ilmaääneneristävyyteen olisi mahdollisimman vähäinen, tulisi raon pinta-alan osuus suhteessa tiiviiseen rakenteeseen olla mahdollisimman pieni. Tiiviiden vaikutus kasvaa ääneneristävyyden kasvaessa. Kuvassa 10 on esitetty yhteiseristävyys raolle ja rakenteelle eri ääneneristävyyssarvoilla. Ilmaääneneristävyys on taajuudesta riippuvainen, joten ääneneristävyyssarvoja ei voi suoraan soveltaa ilmaääneneristävyyteen.



**Kuva 10.** Raon ja rakenteen yhteiseristävyys eri raon pinta-aloilla tiiviin rakenteen ollessa 30, 50 ja 70 dB [32].

Raon pinta-alan prosenttiosuuden vaikutus ääneneristävyyteen on sitä suurempi, mitä korkeampi ääneneristävyyden arvo on. Mitä suurempi raon pinta-ala on, sitä pienemmäksi ilmaääneneristävyytluku muodostuu. Jos raon pinta-alan osuus on prosentin luokkaa tai sitä suurempi, ei tiiviin rakenteen ääneneristävyydellä ole vaikutusta lopulliseen ilmaääneneristävyyssarvoon, vaan rako heikentää ilmaääneneristävyyttä merkittävästi jätään 20 dB suuruiseksi. Riittävän pienillä raon pinta-alaosuuksilla tiiviin rakenteen ilmaääneneristävyydellä ei ole juurikaan merkitystä koko rakenteen ilmaääneneristävyyteen. [32]

### 4.3 Ilmaääneneristävyyden teoreettinen tarkastelu

Ilmaääneneristävyyttä julkisivurakenteessa pystytään tarkastelemaan laskennallisesti sekä tiiviillä että epätiiviillä sisäkuorilla. Ensin tarkastellaan ilmaääneneristävyyssarvoja yksinkertaisilla levyrakenteilla, jotka yhdistetään kaksinkertaiseksi rakenteeksi. Ideaalitulanteessa ilmaääneneristävyys kuvaa kaksinkertaisen kytkemättömän rakenteen ilmaääneneristävyyttä, joka on jatkuva paloittain määritelty taajuuden funktio. Todellisuudessa ilmaääneneristävyyteen vaikuttaa muun muassa ilmvälin absorptio ja rankareitti. Korjaustermeillä saadaan ilmvälin absorption ja rankareitin vaikutukset huomioon otettua lopullisen ilmaääneneristävyyden laskennassa. Epätiiviillä rakenteilla sisäkuoren halkeamat heikentävät ääneneristävyyttä. Halkeamien vaikutus huomioidaan yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyyssarvoissa, minkä jälkeen laskentaprosessi on vastaavanlainen kuin tiiviillä rakenteilla.

### 4.3.1 Yksinkertainen levyrakenne

Seinärakenteen ilmasteneristävyyden määrittämiseksi lasketaan ensin jokaisen levyrakenteen materiaaliparametrit erikseen. Ilmasteneristävyyttä varten määritetään levyrakenteen taivutusjäykkyydet. Taivutusjäykkyys  $B$  yksinkertaisille levyrakenteille on

$$B = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{d^3}{12} \quad (2)$$

jossa

$E$  on materiaalin kimmomoduuli,

$\nu$  on Poissonin vakio ja

$d$  on rakenteen paksuus. [32]

Esimerkiksi julkisivulevy ja rappaus ovat toisissaan kiinni, jolloin taivutusjäykkyys julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmälle eli kahden toisissaan jäykästi kiinni olevan levyn taivutusjäykkyys on

$$B = \sum_{i=1}^n (E_{eff,i} I_{0,i} + E_{eff,i} d_i (y_i - y_0)^2) \quad (3)$$

jossa

$E_{eff,i}$  on materiaalin efektiivinen kimmomoduuli

$I_{0,i}$  on neliömomentti

$d_i$  on materiaalin paksuus

$y_i$  on materiaalin vetojäykkyysskeskiö ja

$y_0$  on yhdistetyn materiaalin vetojäykkyysskeskiö.

Kahteen suuntaan taipuvalla levyrakenteella efektiivinen kimmomoduuli saadaan muotoon

$$E_{eff,i} = \frac{E_i}{1 - \nu^2} \quad (4)$$

ja materiaalin neliömomentti on

$$I_{0,i} = \frac{d^3}{12} \quad (5)$$

Materiaalin vetojäykkyysskeskiö  $y_0$  on

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i d_i y_i)}{\sum_{i=1}^n (E_i d_i)} \quad (6)$$

jossa



$E$  on materiaalin kimmomoduuli [Pa]

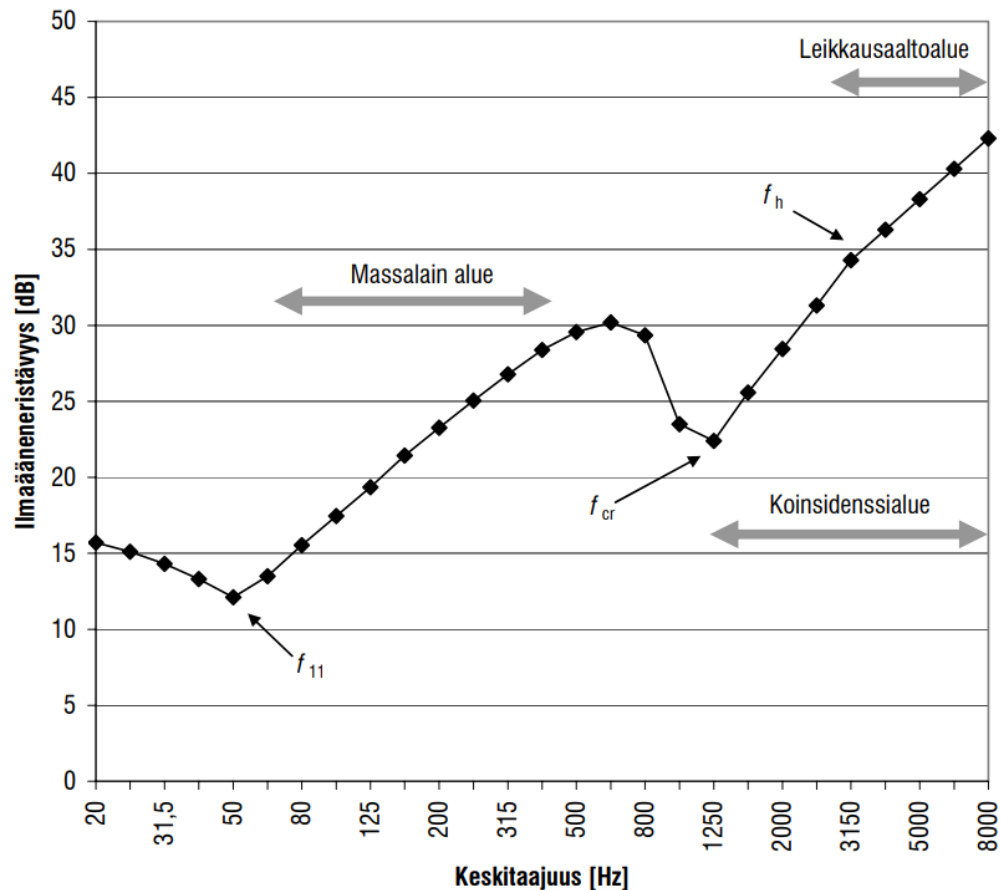
$d$  on materiaalin paksuus [m]

$y$  on materiaalin vetojäykkyykeskiö [m]. [32]

Yhdistetyn materiaalin vetojäykkyykeskiöksi saadaan julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmällä

$$y_0 = \frac{E_1 d_1 y_1 + E_2 d_2 y_2}{E_1 d_1 + E_2 d_2} \quad (7)$$

Materiaalin taivutusjäykkyys vaikuttaa koinsidenssirajataajuuden suuruuteen. Rakenteilla esiintyy tyypillisesti kolme eri rajataajuutta. Rakenteen alin ominaistajuus  $f_{11}$ , keskimäinen taajuus on koinsidenssirajataajuus  $f_c$  ja korkein rajataajuus leikkausaaltoalueen rajataajuus  $f_h$ . Rajataajuudet yksinkertaisille rakenteille on esitetty kuvassa 11.



**Kuva 11.** Yksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyyttä taajuuden funktiona [37].

Alimman ominaistajuuden ja koinsidenssirajataajuuden välisellä alueella massalaki on voimassa. Koinsidenssirajataajuuden jälkeinen alue on määritelty koinsidenssialueeksi. Leikkausaaltorajataajuutta suuremmilla taajuuksilla esiintyy leikkausaaltoalue. [37]

Rakenteen alin ominaistajuus on

$$f_{11} = \frac{c^2}{4f_c} \left( \frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} \right) \quad (8)$$

jossa

$f_c$  on koinsidenssin rajataajuus [Hz]

$l_x$  on rakenteen leveys [m] ja

$l_y$  on rakenteen korkeus [m].

Alimman ominaistajuuden arvot ovat yleensä niin alhaisella ääneneristävyyalueella, ettei niillä ole merkitystä käytännössä seinärakenteiden ääneneristävyyksiä tarkasteltaessa. Alimman ominaistajuuden yläpuolella ilmaääneneristävyys noudattaa massalakia ja ilmaääneneristävyydeksi  $R_0$  saadaan

$$R_0 = 20 \log m' + 20 \log f - 47 \quad (9)$$

jossa

$m'$  on rakenteen pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] ja

$f$  on taajuus [Hz].

Massalain mukaan ilmaääneneristävyys paranee 6 dB, kun rakenteen pintamassa  $m'$  ja taajuus  $f$  kaksinkertaistuvat. Massalaki on voimassa alimman ominaistajuuden yläpuolella ennen koinsidenssirajataajuutta. Ilmaääneneristävyys kasvaa massalain mukaisesti, kunnes se on noin puolet koinsidenssirajataajuudesta  $f_c$ . Koinssidenssirajataajuus on

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}} \quad (10)$$

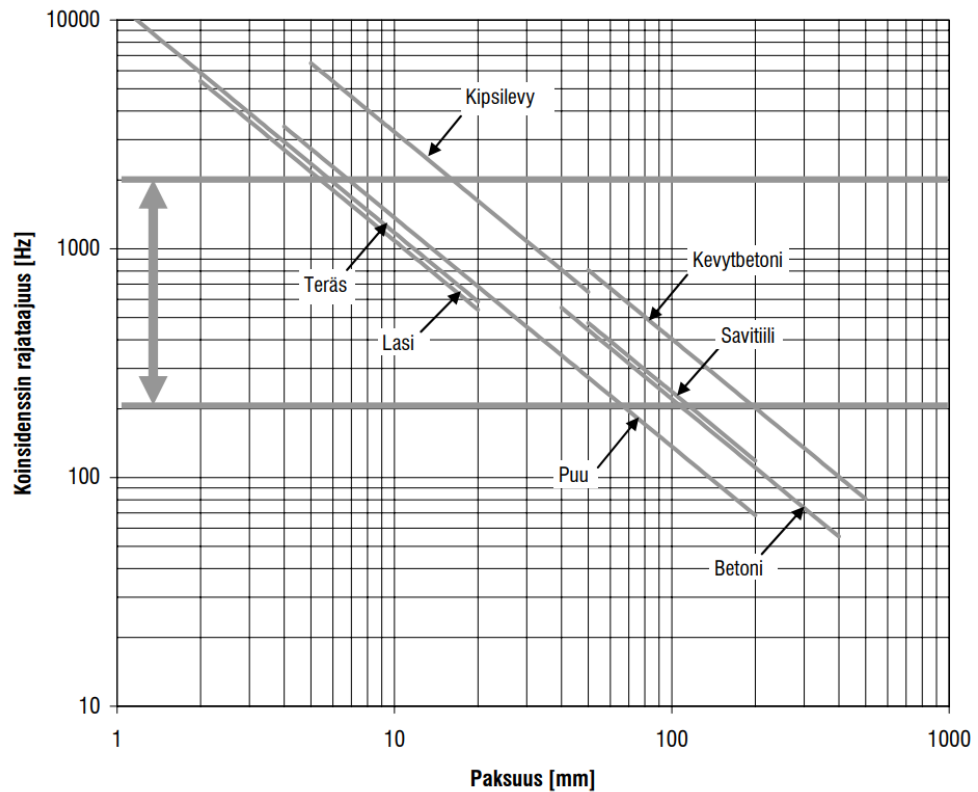
jossa

$c$  on äänen nopeus ilmassa [m/s].

Koinsidenssirajataajuus on äänennopeuden lisäksi riippuvainen rakenteen pintamassasta ja taivutusjäykkyydestä. Koinssidenssi-ilmiö on suurimmillaan rajataajuudella  $f_c$ . Koinssidenssirajataajuutta lähestyttäessä ilmaääneneristävyys alkaa heikentyä, ja koinsidenssirajataajuudella saavutetaan massalain alueella ilmaääneneristävyyden minimiarvo. Rakenteen taipuu rakenteeseen kohdistuvan äänitehon vaikutuksesta synnyttäen rakenteeseen taivutusaallon. Koinssidenssirajataajuudella taivutusaallon nopeus yhtä suuri kuin äänen nopeus ilmassa. Taivutusaallon nopeus rakenteessa on riippuvainen taajuudesta, kun taas äänen nopeus ilmassa on vakio eikä taajuudesta riippuvainen. [37]

Koinsidenssirajataajuuden ja taivutusjäykkyyden kaavojen mukaan koinsidenssirajataajuus on sitä alhaisempi, mitä suurempi rakenteen taivutusjäykkyys  $B$  on ja mitä pienempi rakenteen pintamassa  $m'$  on. Taivutusjäykkyys on sitä suurempi mitä suurempia ovat materiaalin kimmomoduuli ja rakenteen paksuus. Mitä raskaampi ja paksumpi seinärakenne

on, sitä pienempi on sen koinsidenssin rajataajuus. Kevyellä seinärakenteella, kuten esimerkiksi kipsilevyllä, on näin ollen suuri koinsidenssirajataajuus. Koinsidenssialueen vaikutusta eri materiaaleihin on esitetty kuvassa 12.



**Kuva 12.** Materiaalien koinsidenssitaajuuksia rakenteen paksuuden funktiona [37].

Mitä paksumpi rakenne on, sitä alhaisempi on koinsidenssirajataajuus. Kipsilevy on esimerkiksi terästä kevyempää, jolloin samalla rakenteen paksuudella koinsidenssin rajataajuus on kipsilevyllä korkeampi kuin teräksellä. Kipsilevyä käytetään ääntä eristävissä rakenteissa yleisesti kipsilevyn hyvien ääneneneristysominaisuuksien ansiosta. [37]

Taivutusaaltojen lisäksi rakenteessa esiintyy leikkausaaltoja, kun rakenteen paksuus on riittävän suuri. Leikkausaaltoalueen rajataajuus  $f_h$  on

$$f_h = \frac{1}{f_c} \left( \frac{c}{6h} \right)^2 \quad (11)$$

jossa

$h$  on rakenteen paksuus [m].

Leikkausaaltojen vaikutus on leikkausaaltoalueen yläpuolella. Leikkausaaltoalueen rajataajuus  $f_h$  on riippuvainen rakenteen paksuudesta  $h$  ja koinsidenssitaajuudesta.

Ilmääneneristävyyden laskeminen voidaan jakaa alimmin ominaistajuuden, koinsidenssi- ja leikkausaaltorajataajuuden lisäksi alimman ominaistajuuden alapuolella oleviin taajuuksiin. Alimman ominaistajuuden alapuolella olevat taajuudet ovat kuitenkin matalampia kuin rakennusakustiikassa käsiteltävän taajuusalueen alaraja, jolloin alimman ominaistajuuden alapuolella olevia taajuudet eivät ole rakennusakustiikan kannalta merkittäviä.

Rajataajuuksien selvittämisen jälkeen määritellään ilmääneneristävyydet eri rajataajuuksilla. Ilmääneneristävyys  $R$  on jatkuva paloittain määritelty funktio

$$R = \begin{cases} R_0 + 20\log\left(1 - \frac{f^2}{f_c^2}\right), & f < f_c \\ R_0 + 10\log\eta + 10\log\frac{f}{f_c} + 3, & f \geq f_c \\ R_0 + 10\log\eta + 10\log\frac{f}{f_c} - 10\log\left(\frac{f}{5f_h} + \sqrt{\left(\frac{f}{5f_h}\right)^2 + 1}\right) + 3, & f > f_h \end{cases} \quad (12)$$

Leikkausaaltoalueen ilmääneneristävyyteen vaikuttaa rakenteen häviökerroin  $\eta$ , joka on riippuvainen rakenteen pintamassasta ja taajuudesta

$$\eta = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (13)$$

jossa  $\eta_{int}$  on rakenteen sisäinen häviökerroin.

Rakenteen häviökerroin  $\eta$  kuvaa ilmääneneristävyyden heikentymisen suuruutta koinsidenssin kriittisellä taajuudella. [37, 38]

### 4.3.2 Kytkemätön kaksinkertainen levyrakenne

Kaksinkertaisten rakenteiden puoliskot muodostavat ilmvälän kanssa massa-jousi-massajärjestelmän. Rakenteiden puoliskojen välissä oleva massa toimii jousena ja massalla on ominaistajuutena massa-ilma-massa resonanssitaajuus  $f_{mam}$

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{1}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (14)$$

jossa

$d$  on ilmvälän suuruus [m]

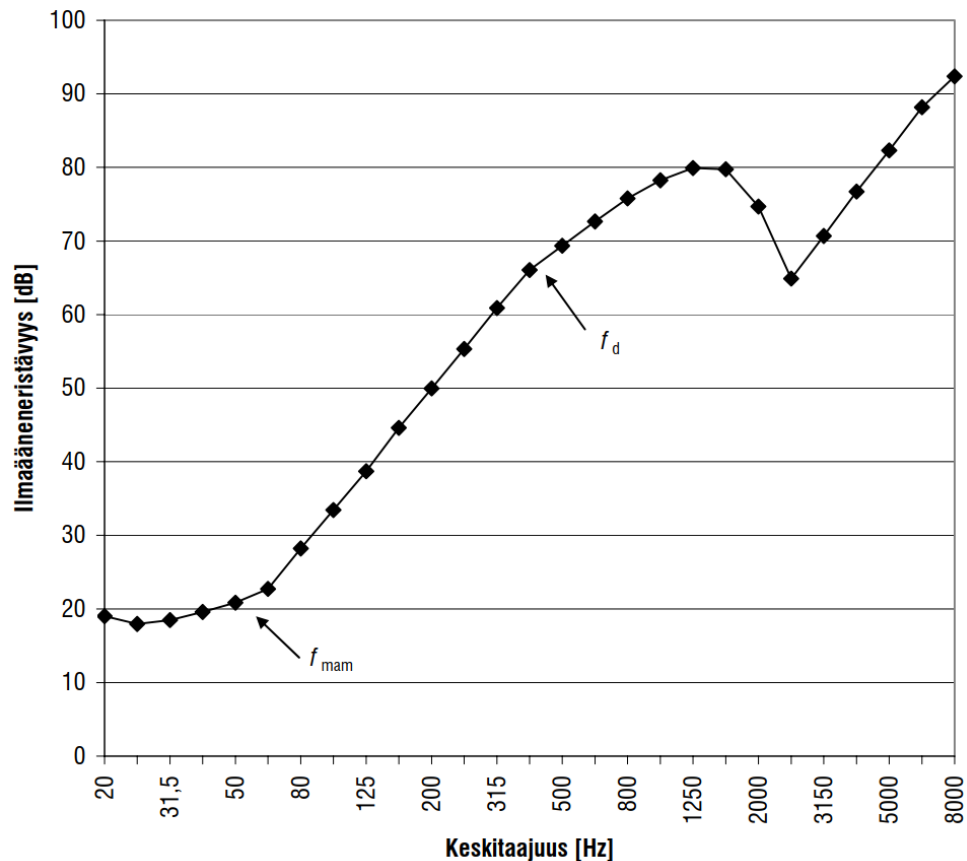
$m_1$  on rakenteen 1 pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

$m_2$  on rakenteen 2 pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ].

Ominaistaajuus on riippuvainen ilmvälin paksuudesta ja rakenteiden pintamassoista. Rajataajuuden  $f_d$  jälkeen ilmväli ei toimi enää jousena ja äänen aallonpituus on pieni suhteessa ilmvälin suuruuteen. Ilmväli  $d$  on kuudesosa äänen aallonpituudesta rajataajuudella  $f_d$ . Rajataajuus  $f_d$

$$f_d = \frac{c}{2\pi d} \quad (15)$$

Kuvassa 13 on esitetty ilmaääneneristävyydet kaksinkertaisilla rakenteilla taajuuden funktiona.



**Kuva 13.** Kaksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona [37].

Ominaistaajuudella  $f_{mam}$  saavutetaan ilmaääneneristävyyden minimikohta, ja seinärakenne on resonanssissa. Mitä suurempia ovat rakenteiden pintamassa  $m_1$  ja  $m_2$  ja mitä suurempi rakenteiden välinen etäisyys eli ilmväli on, sitä matalammaksi ominaistaajuuden arvo muodostuu. Ominaistaajuuden yläpuolella ilmaääneneristävyys kasvaa nopeasti, kunnes saavutetaan rajataajuus  $f_d$ . Rajataajuuden  $f_d$  jälkeen rakenteen toiminta muuttuu, kun kaksinkertaisen rakenteen ilmväli ei enää toimi jousena, ja kaksinkertaisen rakenteen puoliskojen ilmaääneneristävyydet voidaan laskea yhteen. Rajataajuuden  $f_d$  jälkeen ilmaääneneristävyys alkaa heikentyä. Kaksinkertaisilla rakenteilla näkyy myös yksinkertaisten rakenteiden ominaisuudet, kuten esimerkiksi koinsidenssirajataajuus noin 2500 Hz taajuuden kohdalla ja leikkausaaltoalueen vaikutus korkeimmilla taajuuksilla. [37]

Ilmaääneneristävyys kaksinkertaisilla kytkemättömillä rakenteilla on jatkuva paloittain määritelty funktio

$$R_{ideal} = \begin{cases} 20\log\left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}}\right), & f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20\log(fd) - 29, & f_{mam} < f < f_d \\ R_1 + R_2 + 6, & f > f_d \end{cases} \quad (16)$$

jossa

$R_1$  on yksinkertaisen rakenteen 1 ilmaääneneristävyys

$R_2$  on yksinkertaisen rakenteen 2 ilmaääneneristävyys.

Kaksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyys riippuu yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävydestä ja niiden massoista. Lisäksi ilmavälistä aiheutuva resonanssitaaajuus vaikuttaa ilmaääneneristävyden arvoon kaksinkertaisilla rakenteilla. Kun lasketaan kaksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyttä, huomioidaan massalain korjaus ainoastaan toisen yksinkertaisen rakenteen kohdalla. Muuten massalain korjaus kertaantuu, ja ilmaääneneristävyys on liian suuri matalilla taajuuksilla ja liian pieni korkeilla taajuuksilla. [37]

### 4.3.3 Ilmavälin absorptiomateriaalin huomioiminen

Ilmavälin absorptiomateriaalin tarkoituksena on estää ilmavälin kaiunta ja kaiunnasta johtuva ilmaääneneristävyden heikkeneminen. Rakenteen ilmaääneneristävyys heikenee, jos kaksinkertaisen rakenteen ilmavälissä ei ole absorptiomateriaalia, ja ääneneristävyys voi heiketä jopa 20 dB. Ilman absorptiomateriaalia ilmaväliin syntyy seisovia aaltoja, jotka aiheuttavat kaiuntaa. Kaiuntaa tapahtuu pienillä ja keskisuurilla taajuuksilla pääosin rakennelevyn suuntaisesti, mutta suurilla taajuuksilla kaiuntaa tapahtuu myös kohtisuoraan levyjä vasten. Ilmavälin absorptiomateriaalin tarkoituksena on estää kaiunta, etenkin levyn suuntaisten seisovien aaltojen muodostuminen. Levynsuuntaiset seisovat aallot heikentävät ilmaääneneristävyttä alle 1000 Hz taajuuksilla. Absorptiomateriaalista riippuvainen ilmaääneneristävyden muutos  $\Delta R_{cav}$  saadaan laskettua kaavasta

$$\Delta R_{cav} = 10\log\alpha_{eff} = 10\log(\alpha_c FR) \quad (17)$$

jossa

$\alpha_{eff}$  on ilmavälin tehollinen absorptiosuhde

$\alpha_c$  on materiaalin absorptiosuhde ja

FR on ilmavälin täyttösuhde.

Materiaalin absorptiosuhde  $\alpha_{eff}$  saa arvoja nollan ja yhden välillä, minkä vuoksi  $\Delta R_{cav} < 0$  dB. Tyhjälle ilmavälille  $\alpha_{eff} = 0,05$ , mistä saadaan ilmaääneneristävyden heikennykseksi

13 dB. Mineraalivillalla täytetyillä ilmapäleillä  $\alpha_{\text{eff}}=1,00$ , jolloin ilmapäli ei heikennä ääneneristävyyttä ollenkaan ja  $\Delta R_{\text{cav}}=0$  dB. [37, 39]

Rajataajuus  $f_{\text{cav}}$  on riippuvainen äänen nopeudesta ilmassa ja ilmapälin leveydestä tai korkeudesta riippuen kumpi mitta on suurempi. Rajataajuus  $f_{\text{cav}}$  on

$$f_{\text{cav}} = \frac{c}{2\max(L_x, L_y)} \quad (18)$$

jossa

$\max(L_x, L_y)$  on ilmapälin suurempi arvo leveydestä tai korkeudesta.

Ilmapälin absorptiomateriaali huomioidaan kavitteen resonanssirajataajuuden  $f_{\text{cav}}$  yläpuolella, sillä absorptiomateriaalilla on vaikutusta ilmapäneristävyyteen vain rajataajuutta  $f_{\text{cav}}$  suuremmilla arvoilla. Ilmapäli ei kaitu rajataajuuden  $f_{\text{cav}}$  alapuolella olevilla taajuuksilla, jolloin aallonpituuden puolikas on suurempi kuin ilmapälin suurin vapaa mitta. Tällöin ääni ei mahdu resonimaan ilmapälissä. Ilmapälin absorptiomateriaalin huomioimisen myötä ilmapäneristävyyden paloittain määritelty jatkuva funktio muuttuu muotoon

$$R_{\text{air}} = \begin{cases} R_{\text{ideal}}, & f < f_{\text{cav}} \\ R_{\text{ideal}} + \Delta R_{\text{cav}}, & f > f_{\text{cav}} \end{cases} \quad (19)$$

Rajataajuus  $f_{\text{cav}}$  on riippuvainen äänen nopeudesta ilmassa ja ilmapälin leveydestä tai korkeudesta riippuen kumpi mitta on suurempi. [7, 37, 39]

#### 4.3.4 Seinärakenteen rankareitin huomioiminen

Kytketyn kaksinkertaisen levyrakenteen ilmapäneristävyyteen otetaan huomioon kytkemättömien levyrakenteiden lisäksi ilmapälin absorptiomateriaalista aiheutuvat korjauskertoimet ja seinärakenteen rankareitin vaikutus. Kytkeyillä rakenteilla ilmapäni siirtyy sekä levyrakenteiden läpi että mekaanisten kiinnikkeiden kautta, minkä vuoksi rankareitin kautta kulkeutuva ääni täytyy huomioida. Yksinkertaisen ja kaksinkertaisen seinärakenteen ilmapäneristävyydet on määritetty kytkemättömille seinärakenteille, mutta todellisuudessa kytketty levyrakenne aiheuttaa ilmapänen kulkeutumista kytkettyjen rakenneosien kautta. Ilmapäneristävyys heikkenee erityisesti keskitaajuuksilla ja suurilla taajuuksilla. Eri reittien kautta kulkeva äänienergioiden suhde on riippuvainen taajuudesta ja eri reittien akustisesta kytkennästä. [7]

Rajataajuuden yläpuolella rankojen ilmapäneristävyyttä heikentävä vaikutus alkaa, ja rajataajuus on riippuvainen rakenteen pintamassoista ja koinsidenssitaaajuuksista. Kokonaisääneneristävyys rankareitille saadaan massalain  $R_{\text{sum}}$  ja rankareitin korjaustermin  $\Delta R_m$  summasta, kun rankareitin ilmapäneristävyys  $R_{\text{ranka}}$  saadaan yhtälöstä

$$R_{ranka} = R_{sum} + \Delta R_m \quad (20)$$

Kaksinkertaisen rakenteen ääneneristävyys massalain mukaan on  $R_{sum}$  ja rankareitistä aiheutuva kaksinkertaisen rakenteen ääneneristävyuden muutos  $\Delta R_m$  saadaan seuraavista yhtälöistä

$$R_{sum} = 20 \log \left( 10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) \quad (21)$$

$$\Delta R_m = 10 \log \left( b \left( \frac{m'_1 \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 m'_2} \right)^2 \right) - 23 \quad (22)$$

jossa

$b$  on viivakytkentöjen eli rankojen välinen etäisyys [m]. [7]

Joustavat rangat parantavat ilmaääneneristävyyttä, mikä huomioidaan joustavan rangan muutostermillä  $\Delta R_{fb}$ . Jäykkien rankojen tapauksessa  $\Delta R_{fb}=0$  dB. Lopullinen ilmaääneneristävyys kytketyillä kaksinkertaisilla rakenteilla on rajataajuuden  $f_{mam}$  alapuolella kaavan 21 mukainen ilmaääneneristävyys  $R_{sum}$ . Kun taajuus on  $f \geq f_{mam}$ , ilmaääneneristävyys on rankareitin ja ilmavälin absorptioin minimiarvo kaavan 25 mukaan

$$R = \begin{cases} 20 \log \left( 10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_m + \Delta R_{fb} \\ R_1 + R_2 + 20 \log(fd) - 29 + \Delta R_{cav} \\ R_1 + R_2 + 6 + \Delta R_{cav} \end{cases} \quad (23)$$

Ilmaääneneristävyys määräytyy käytännössä pienemmän  $R_{ranka}$  ja  $R_{cav}$  ilmaääneneristävyuden arvoista. [7]

#### 4.3.5 Viivamaisen raon ilmaääneneristävyuden laskentateoria

Epätiivillä sisäkuorella on vaikutusta rakenteiden akustiseen toimivuuteen. Rakojen ja sisäkuoren halkeamien kautta ääntä siirtyy ilmaäänenä julkisivurakenteen läpi paremmin ja rakenteen ilmaääneneristävyys heikkenee. Yksinkertaisilla malleilla tarkastellaan yksiuotteisesti äänen kulkemista raon kautta. Rakojen ilmaääneneristävyuden laskentateoria viivamaisen raon tapauksessa voidaan laskea Gomperts ja Kihlmannin [6] teorian avulla. Gomperts ja Kihlmannin teoria on yksinkertaisempi laskentamalli viivamaisten rakojen ilmaääneneristävyyteen.

Päätekorjauskertoimen  $e$  on dimensioton suure

$$e = \frac{\alpha}{\beta} \quad (24)$$

jossa



$\alpha$  raon päätekorjaus ja  
 $\beta$  on raon leveys.

Päätekorjauskerrointa  $e$  approksimoidaan viivamaiselle raolle kaavasta

$$e = \frac{2}{\pi} \left( \ln \frac{8}{K} - \gamma' \right) \quad (25)$$

jossa

$\gamma'$  on Eulerin vakio ja

$K$  on dimensioton suure

$$K = \frac{2\pi f\beta}{c_0} \quad (26)$$

Kaava pätee, kun  $K \leq 0,5$ . Taajuudella 5000Hz esimerkiksi raon leveys voi olla 5,46 mm. Yli 5,5 mm raoilla kaava ei päde ja leveillä raoilla laskennan tulosten luotettavuus on epävarmempi kuin kapeammilla raoilla. Raon ilmajääneneristävyys lasketaan kaavalla

$$R_{rako} = 10 \log \frac{2n^2 \left( \frac{\sin^2(K(L+2e))}{\cos^2(Ke)} + \frac{K^2}{2n^2} (1 + \cos(K(L+2e))\cos(KL)) \right)}{mK\cos^2(Ke)} \quad (27)$$

jossa

$m$  on 8 diffuusille äänikentälle

$n$  on 1, jos rako on rakenteen keskellä äänilähteen puolella tai 0,5, jos rako on seinärakenteen nurkassa ja

$L$  on dimensioton suure

$$L = \frac{l}{\beta} \quad (28)$$

jossa

$l$  on raon syvyys eli sisäkuoren paksuus.

Kerroin  $n$  huomioi raon läheisyydessä olevat rakenteet, jolloin äänenpaine kasvaa lähellä olevan pinnan takia. Siksi raon sijaintia tarkastellaan äänilähteen puolella eli sisäkuoren tapauksessa sisätilan puolelta. Diffuusi kenttä on äänikenttä, jossa ääretön määrä korreloimatonta tasoaaltoa pystyy etenemään kaikissa äänikentän pisteissä. [6, 40]

Pinta-alojen ja eri osien ilmajääneneristävyyssarvojen perusteella lasketaan energieettinen yhteisääneneristävyys, joka kuvaa koko rakenteen ilmajääneneristävyyden keskiarvoa. Sisäkuoren ja raon yhteisvaikutus  $R_{\text{sisäkuori+rako}}$  saadaan yhtälöstä

$$\begin{aligned}
 R_{\text{sisäkuori+rako}} &= -10 \log \left( \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n S_i 10^{-0,1R_i} \right) \\
 &= -10 \log \frac{(S_{\text{tot}} - S_{\text{rako}}) 10^{-\frac{R_1}{10}} + S_{\text{rako}} 10^{-\frac{R_{\text{rako}}}{10}}}{S_{\text{tot}}}
 \end{aligned} \tag{29}$$

jossa

$S_i$  on rakenteen pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$S_{\text{tot}}$  on koko sisäkuoren pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$S_{\text{rako}}$  on raon pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$R_1$  on sisäkuoren ilmastäneristävyyden arvo [dB] ja

$R_{\text{rako}}$  on raon ilmastäneristävyyden arvo [dB].

Raot tai halkeamat sisäkuoressa heikentävät ääneneristävyyttä. Halkeamien vaikutus ääneneristävyyteen huomioidaan ilmastäneristävyyden arvoissa, mutta rankareitin korjaustermiin sillä ei ole vaikutusta. Sisäkuoressa olevat halkeamat eivät lisäksi muuta julkisivussa olevia ilmastäneristävyyden arvoja. Halkeamien vaikutus huomioidaan yksinkertaisen sisäkuoren ilmastäneristävyyden arvoissa, minkä jälkeen lopullinen ilmastäneristävyyden arvo lasketaan samoin kuin tiiviiden rakenteiden ilmastäneristävyyden arvo. Yksinkertaisten rakenteiden ilmastäneristävyyden arvo lasketaan kaksinkertaisena kytkemättömänä rakenteena, minkä jälkeen huomioidaan ilmastäneristävyyden absorptiovaikutus ja rankareitin vaikutus lopulliseen ilmastäneristävyyden arvoon. [6, 7, 32]

#### 4.3.6 Vertailukäyrämenetelmä ja spektripainotustermit

Paloittain määritetyn funktion ilmastäneristävyyden arvo lasketaan standardin ISO 717-1 mukaisilla taajuuksien arvoilla kolmannesoktaavikaistoittain eli terssikaistoittain. Terssikaistojen taajuuksilla muodostetaan myös vertailukäyrä, jota siirretään ilmastäneristävyyden arvojen suhteen niin, että vertailukäyrän arvojen ja ilmastäneristävyyden erotuksen summa on enintään 32 dB. Kun vertailukäyrä on saatu asetettua oikealle kohdalle, luetaan ilmastäneristävyyden arvo 500 Hz taajuuden kohdalta. Tämä vertailukäyrän suhteuttaminen tehdään kaikkien ilmastäneristävyyden laskujen tapauksissa, ja lopullinen ilmastäneristävyyden arvo määräytyy 500 Hz taajuuden kohdalta vertailukäyrältä. Jos terssikaistojen sijaan käytettäisiin oktaavikaistoja, täytyisi vertailukäyrä asettaa niin, että vertailukäyrän ja laskettujen ilmastäneristävyyden arvojen väliin jäävät ilmastäneristävyyden arvojen summa olisi maksimissaan 10 dB. [38]

Melun vaikutusta ääneneristävyyteen ilmoitetaan spektripainotustermien avulla. Ääneneristävyyden arvoja määritettäessä ilmoitetaan tieliikenne- tai liikennemelua vastaava ääneneristävyyden arvo, ja julkisivurakenteiden tapauksessa tieliikennemelu on tärkeämpi tekijä. Ilmastäneristävyyden arvo tieliikennemelua vastaan määritellään  $R_w + C_{tr}$  ja ilmastäneris-

tävyys liikennemelua vastaan  $R_w+C$ , jossa  $R_w$  on vertailukäyrältä saatu ilmaääneneristävyys,  $C_{tr}$  on tieliikennemelusta aiheutuva spektripainotusermi ja  $C$  liikennemelusta aiheutuva spektripainotusermi. [38]

Spektripainotusermi  $C_j$  määritellään kaavan mukaan

$$C_j = X_{A,j} - R_w \quad (30)$$

jossa

$R_w$  on vertailukäyrältä saatu ilmaääneneristävyys ja  $X_{A,i}$  lasketaan kaavasta

$$X_{A,j} = -10 \log \sum 10^{\frac{L_{ij}-R_{tot,i}}{10}} \quad (31)$$

jossa

$L_{ij}$  ovat taajuuden spektritasoja ja

$R_{tot,i}$  on ilmaääneneristävyudet eri taajuuskaistoilla.

Taajuuskaistat lasketaan joko oktaavikaistoittain tai kolmannesoktaavikaistoittain eli terssikaistoittain. Julkisivujen tapauksessa määritetään ilmaääneneristävyksiä tieliikennemelua vastaan. [38]

## 5. JULKISIVUN RAKENNUSFYSIKAALINEN TARKASTELU

Ulkoseinärakenteen tarkoituksena on suojata sisätiloja ulkoilman vedeltä ja kosteudelta sekä mahdollistaa sisätiloissa haluttu lämpötila. Ulkoseinärakenteen täytyy olla eristävyydeltään ja tiiviydeltään riittävä halutun sisälämpötilan saavuttamiseksi energiataloudellisesti. Haitallista kosteuden tunkeutumista ei saa kulkeutua ulkoseinärakenteen läpi. Rakennuksen vaurioista suurin osa on kosteuden aiheuttamaa [46]. Kosteus ei myöskään saa kerääntyä rakenteeseen tai kerääntyneen kosteuden on pystyttävä kuivumaan rakenteesta. Kosteus ei saa aiheuttaa kestävyuden tai rakenteen toimivuuden alenemista ulkoseinärakenteessa. [41]

Rakennusfysiikan kannalta lämmön ja kosteuden eri siirtymismuodot rakenteen läpi ovat tärkeässä asemassa suunniteltaessa toimivaa julkisivurakennetta. Ulkoseinärakenteissa seinän sisäpinnassa on vesihöyrytiivimpi kerros, mikä on usein höyrynsulku lämmöneristeen sisäpinnassa. Höyrynsulun merkityksenä on rajoittaa vesihöyryn kulkeutumista rakenteen läpi. Rakenteen sisäpinnan vesihöyryntiiveyttä tärkeämpää on kuitenkin ilmatiivis julkisivurakenne. Hallitsemattoman ilmavirtauksen mukana rakenteeseen kulkeutuva vesihöyry voi aiheuttaa pahimmillaan vesihöyryn tiivistymisen rakenteeseen vetenä, jolloin seinärakenteen kosteusvaurioriskit kasvavat merkittävästi. [13]

### 5.1 Lämmön siirtyminen rakenteissa

Atomien ja molekyylien värähtelyliikettä kutsutaan lämmöksi, mikä siirtyy rakenteissa johtumalla, säteilemällä tai konvektiolla. Lämmön siirtymismuodoista lämmön johtuminen on rakenteiden kannalta keskeisin, ja lämpösäteilyn vaikutus on keskeinen rakenteiden ulkopuolella. Vesihöyryn konvektio on kosteusvaurioiden tarkastelujen kannalta tärkein lämmönsiirtymismuoto. [14]

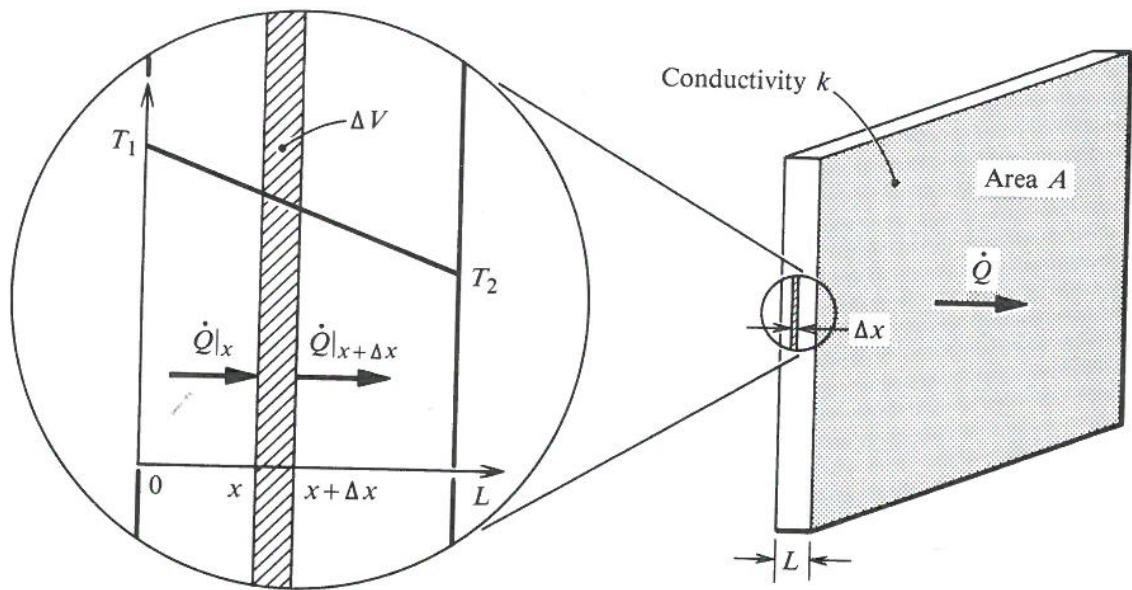
#### 5.1.1 Lämmön johtuminen

Lämmön johtumisessa lämpö virtaa, kun molekyylien liike-energia siirtyy molekyyleistä toiseen. Lämpöenergia pyrkii väliaineessa kohti tasapainotilaa virraten lämpimämmästä ilmasta kylmempään. Lämpö voi siirtyä johtumalla kiinteissä aineissa tai nesteissä. [14, 20]

Rakenteissa tapahtuvista lämmönsiirtymisilmiöistä lämmönjohtuminen on keskeisin lämmön siirtymismuoto, ja rakentamismääräyksessä on asetettu arvot rakenteiden lämmönjohtavuuksille. Lämmönjohtavuus määritellään lämpömääräksi, joka tasapainotilassa lä-

päisee homogeenisen ainekerroksen pinta-alayksikön suuruisena ja pituusyksikön pak-  
suisena aikayksikössä [5]. Materiaalin lämmönjohtavuus on suoraan verrannollinen siir-  
tyvään lämpöenergiaan, eli lämmönjohtavuuden kaksinkertaistussa myös siirtyvä läm-  
pöenergia kaksinkertaistuu. Käytetyillä rakennusmateriaaleilla on vaikutusta lämmön  
siirtymiseen erilaisten materiaaliominaisuuksien vuoksi. Esimerkiksi rakenteissa olevat  
kylmäsilat johtavat paljon paremmin lämpöä verrattuna muuhun rakenteisiin, ja metallit  
johtavat tiheämpinä materiaaleina paremmin lämpöä kuin huokoiset materiaalit. [42]

Kuvassa 14 on esitetty yksidimensionaalinen lämmön johtuminen levymäisen seinän läpi.



**Kuva 14.** Yksidimensionaalinen lämmön johtuminen seinän paksuuden funktiona [44].

Vasemmalla puolen kohdassa  $x=0$  lämpötila on  $T_1$ . Lämpötila muuttuu lineaarisesti  $T_2$  arvoon kohdassa  $x=L$ , missä  $L$  on seinän paksuus ulkopinnalla. Kun Lämpötila  $T_1 > T_2$ , niin lämpövirta kulkee  $x$ -akselin suuntaan ja on positiivinen. Kun tarkastellaan  $\Delta x$  pak-  
suista seinän kohtaa, negatiivinen lämpövirran muutos  $x$ :n suhteen vastaa lämpövirran tiheyttä. Tätä lämpövirran kulkeutumista seinän läpi kutsutaan Fourierin laiksi. Fourierin laki lämmön johtumisesta on esitetty kaavoissa 32 ja 33

$$\frac{\dot{Q}}{A} = q \quad (32)$$

jossa pinta-ala  $A$  on eri suuri kuin nolla. Lämpövirran tiheys  $q$  on riippuvainen materiaalin lämmönjohtavuudesta ja ajasta kaavan 33 mukaisesti

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (33)$$

jossa  $dx$  on eri suuri kuin nolla. Lämpövirran tiheyden kaavassa  $k$  on materiaalin lämmönjohtavuus ja  $T$  on lämpötila. [44]

### 5.1.2 Lämpösäteily

Säteilyä, jonka aallonpituus on noin  $0,1 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$ , sanotaan lämpösäteilyksi. Lämpösäteilyssä energian siirtyminen tapahtuu sähkömagneettisella aaltoliikkeellä valon nopeudella. Jokainen kappale lähettää lämpötilansa perusteella suoraviivaisesti etenevää sähkömagneettista säteilyä, joka osuessaan kohteeseen muuttuu lämmöksi. Jokaisesta materiaalista, jonka lämpötila on absoluuttista nollapistettä  $0 \text{K}$  korkeampi, emittoituu lämpösäteilyä. Eniten lämpösäteilyä emittoituu mustasta kappaleesta, ja lämpösäteily siirtyy sähkömagneettisena säteilynä parhaiten väliaineettomassa tyhjiössä, jossa ei ole väliainetta sitomassa lämpöenergiaa. Lämmön siirtyminen säteilyn avulla ei tarvitse väliainetta [18]. [14, 34, 44]

Siirtyvän energian määrään vaikuttaa hyvin voimakkaasti rakenteiden pintojen välinen lämpötilaero sekä pintojen emittoitumiskyky lähettää ja absorboida eli vastaanottaa lämpösäteilyä. Tavanomaiset rakennusmateriaalit absorboivat  $90 \%$  lämpösäteilyä, ja loppu lämpösäteily heijastuu takaisin. Kiiltävä alumiini puolestaan absorboi ainoastaan noin  $3 \%$  lämpösäteilyä. Sisätiloissa lämpösäteilyn merkitys korostuu säteilyn vaikutuksena rakenteiden pintalämpötiloihin. Mitä vähemmän rakenteen pinta absorboi lämpösäteilyä, sitä kylmemmäksi pinta jää ja kosteuden tiivistymisriski kasvaa. Ulkotiloissa auringon lämpösäteily kuivattaa rakenteita, mutta myös siirtää kosteutta rakenteiden ulko-osista rakenteiden sisälle. [14, 44]

Lämpösäteily esiintyy rakenteissa lyhytaaltoisena auringon säteilynä tai pitkäaaltoisena kappaleiden lämpösäteilynä. Lämpösäteilyn kohdatessa kappaleen pinnan, säteily osittain heijastuu ja osittain absorboituu. Kaavan 34 mukaan absorboituneen, heijastuneen ja kappaleen läpi kulkevan säteilyjen osuuksien summa on 1

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (34)$$

missä  $\alpha$  on absorboituneen,  $\rho$  on heijastuneen ja  $\tau$  läpimenneen säteilyn osuus kokonaisenergiasta. Eri osuuksien suuruus on riippuvainen materiaalista, lämpötilasta ja tulevan säteilyn aallonpituudesta. Mustan kappaleen emissiviteetti  $\varepsilon$  eli kappaleen lähettämän säteilyn määrä on 1, sillä mustassa kappaleessa lämpösäteily absorboituu kokonaan eli  $\alpha$  on 1. [14, 44]

Kappale voi lähettää ja vastaanottaa lämpösäteilyä muillakin aallonpituusalueilla kuin lämpösäteilyn  $0,1 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$  alueella, mutta koko säteilyenergiasta hyvin lyhyiden tai pitkäaaltoisten säteilyjen osuus on hyvin pieni. Lämpösäteily eroaa muista sähkömagneettisista säteilyistä ainoastaan aallonpituudeltaan, jolla on kuitenkin suuri vaikutus sä-

teilyn osuessa kappaleeseen. Säteily ei tarvitse väliainetta, toisin kuin muut lämmön siirtymismuodot. Esimerkiksi auringon lähettämä säteily tulee maahan tyhjiön läpi, ja ilmakehä absorboi auringon säteilystä osan. [44]

### 5.1.3 Lämmön konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasu- tai nestevirtausten mukana. Lämmön konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Luonnollisessa konvektiossa lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero aiheuttaa lämmön liikkumista rakenteiden läpi. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu ulkopuolisen voiman vaikutuksen alaisena. Ulkopuolinen voima voi olla esimerkiksi tuuli, koneellinen ilmanvaihto tai ihmisten liikkeestä aiheutuva voima. Lisäksi lämpöä siirtyy aineen olomuodon muuttuessa ilman lämpötilan muutosta eli kun aine esimerkiksi sulaa kiinteästä aineesta nesteeksi tai nesteestä kaasuksi. Tällaista sulamis- tai höyrystymislämpöä sanotaan piileväksi lämmön siirtymismuodoksi. [34]

Kylmän ulkoilman virtaus rakenteissa voi aiheuttaa rakenteiden sisäpinnoille rakenteeseen kondenssiriskin. Rakenteiden pinnalla ilmavirtaukset aiheuttavat lämpösäteilyn ohella lämpötilan muutosta ulkovaipparakenteen pintalämpötiloihin. Mitä suurempi ilmavirtauksen määrä on aikayksikössä eli mitä nopeammin ilma virtaa julkisivun pinnalla, sitä tehokkaampaa on energian siirtyminen ilmasta rakenteeseen ja rakenteesta pois, jolloin rakenteen pintalämpötila nousee tai laskee. Rakenteiden pintalämpötilaan vaikuttaa rakenteen paksuus ja tarkasteltavan materiaalin lämmönjohtavuus, ja pintalämpötila määrittellään rakenteen lämpövastuksen suhteena pintavastukseen. [43]

## 5.2 Kosteuden siirtyminen rakenteissa

Kosteus on kemiallisesti sitoutumatonta vettä, joka voi esiintyä kaasuna, nesteinä tai kiinteässä olomuodossa. Kosteuspitoisuus kuvaa materiaaliin sitoutuneen veden tai vesihöyryn määrän suhdetta materiaalin massaan. Rakenteisiin valuvan sadeveden ja kertyvän kosteuden on poistuttava rakenteista riittävän nopeasti, sisäilman kosteus ei saa kertyä rakenteisiin kosteuslähteeksi ja rakenteisiin kohdistuvat kosteusvaihtelut saavat ylittyä ainoastaan hetkellisesti. Rakenteisiin jäävän kosteuden syynä voi olla esimerkiksi puutteellinen tuuletusväli julkisivurakenteessa. [45, 46]

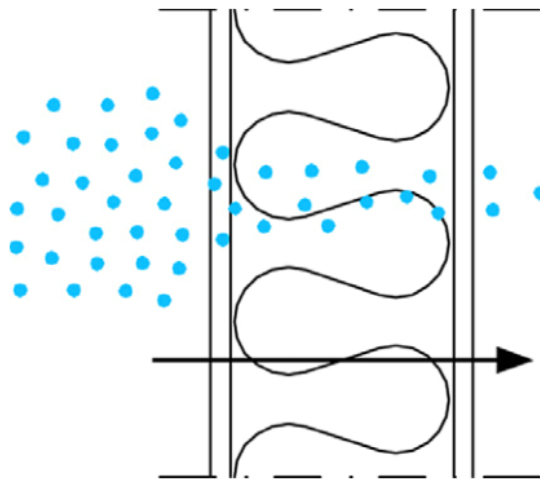
Rakennuskosteudella tarkoitetaan vesimäärää, joka rakenteista poistuu ennen kuin seinärakenne on tasapainotilassa ympäristönsä kanssa. Rakenteisiin jäävä rakennuskosteus poistuu kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa julkisivun pinta on kostea ja kuivumisnopeus on vakio. Kun julkisivurakenteen kriittinen kosteuspitoisuus ylitetään, rakenteen pintaan alkaa kertyä kosteutta. Mitä suurempi rakenteen kapillaarinen imukyky on, sitä kauemmin rakenteen pinta on kostea. Toisessa vaiheessa kuivumisnopeus ei ole enää vakio vaan hidastuu, koska kosteusrintama siirtyy syvemmälle rakenteeseen ja kuivumiseen tarvittava matka kasvaa. Kuivumisnopeuteen vaikuttavat rakenteen mitat, materiaaliominaisuudet ja rakenteen ja ympäristön kosteusolosuhteet. [20]

Sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttavat ulkoilman kosteuspitoisuus, sisällä olevan kosteuden määrän kehittyminen ja ilmanvaihdon suuruus. Kosteuden tuotto rakennuksen sisällä on lähes nolla, kun rakennuksessa ei ole ihmisiä ollenkaan. Kun rakenteen pinnan lämpötila on alhaisempi verrattuna ympäröivään lämpötilaan, tiivistyy rakenteen pinnalle kosteutta. [45]

Ulkoseinärakenteet kastuvat pääasiassa viistosateen takia. Kosteus siirtyy julkisivurakenteissa pääasiassa vesihöyryn diffuusiolla ja konvektiolla eli ilmavirtausten mukana tai vedenä kapillaarisesti ja paine-eron tai painovoiman aiheuttamana nestevirtauksena. Rakenteen tiivyydestä, ilman- ja vesihöyrynläpäisevyydestä riippuu, onko vesihöyryn diffuusio vai konvektio hallitseva kosteuden siirtymismuoto. Rakenteen sisäkuoren on oltava riittävän ilmatiivis haitallisten ilmapuotojen estämiseksi. [13, 20]

### 5.2.1 Vesihöyryn diffuusio

Diffuusiassa kaasuseoksen kaasumolekyylit liikkuvat tilaan, jossa kaasumolekyylit ovat tasaisesti jakautuneet. Rakennusfysiikassa diffuusiolla tarkoitetaan vesihöyryn siirtymistä rakenteen läpi kuvan 15 mukaisesti.



**Kuva 15.** Vesimolekyyliden siirtyminen rakenteen läpi diffuusiolla [13].

Kun ilmassa on kosteuspitoisuuseroja eli vesihöyryn osapaineet ovat erisuuruiset seinärakenteessa kuin sisätilassa, kulkeutuu vesihöyry seinärakenteen läpi diffuusiolla. Vesihöyry kulkeutuu pienemmän vesihöyryn osapaineen suuntaan pyrkien tasapainotilaan Daltonin kaasujen osapainelain mukaisesti. Daltonin kaasujen osapainelaki kuvaa kaasuseoksen painetta, missä tietyssä tilavuudessa oleva kaasuseoksen paine on kaasujen osapaineiden summa

$$P_{kok} = \sum_{i=1}^n p_i \quad (35)$$



missä  $p_1, p_2, \dots, p_n$  ovat kaasujen 1, 2, ... n osapaineet. Vesihöyryn osapaine kasvaa vesihöyrypitoisuuden ja lämpötilan kasvaessa. Yleensä diffuusion suunta on lämpimästä tilasta kylmempään, koska sisätiloissa kosteus on ulkoilmaa suurempi. Diffuusio kulkeutuu sisätilasta ulkoseinän läpi ulkoilmaa kohden talvella, kun taas kesällä diffuusion suunta voi vaihdella ulkoilman olosuhteista riippuen. Mitä suurempi osapaineiden välinen paineero tai yksittäisen kaasun pitoisuusero on, sitä voimakkaampaa vesihöyryn diffuusio on rakenteen läpi. [47, 48]

Vesihöyryn diffuusion vaikuttaa paine-erojen tai vesihöyryn pitoisuuserojen suuruuden lisäksi materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, joka kuvaa materiaalin kykyä läpäistä vesihöyryn diffuusiota. Homogeenisessa ainekerroksessa diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys noudattaa yksidimensionaalisessa tapauksessa Fickin lakia

$$g_{diff} = -\delta_p \nabla v = -\left( \delta_p \frac{dv}{dx}, \delta_p \frac{dv}{dy}, \delta_p \frac{dv}{dz} \right) \quad (36)$$

missä  $g_{diff}$  on kosteusvirta [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ],  $\delta_p$  on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ja  $\frac{dp}{dx}$  on vesihöyrynpaineen muutos matkalla  $x$ . Vesihöyrynläpäisevyys tarkoittaa yhden pituusyksikön paksuisen ja yhden yksikön suuruisen pinta-alan kokoisen materiaalikerroksen läpi kulkevaa vesimäärää aikayksikössä. Kosteusvirran tiheys voidaan esittää myös vesihöyrynvastuksen ja vesihöyrypitoisuuseron avulla

$$g_{diff} = \frac{v_1 - v_2}{\sum_{i=1}^n Z_{vi}} = \frac{v_1 - v_2}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\delta_{vi}}} \quad (37)$$

jossa

$v_1$  ja  $v_2$  ovat vesihöyrynpitoisuudet [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],

$Z_v$  on vesihöyrynvastus [ $\text{s}/\text{m}$ ],

$d$  on rakenteen paksuus [ $\text{m}$ ] ja

$\delta_{vi}$  on rakenteen vesihöyrynläpäisevyys [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Vesihöyrynvastus on paksuuden ja vesihöyrynläpäisevyyden suhde. Rakennusfysikaalisesti ongelmia aiheutuu, kun talvella kosteutta voi siirtyä diffuusiolla rakenteeseen enemmän kuin mitä kosteutta ehtii poistumaan rakenteesta. Tämä aiheuttaa lopulta liian suuren kosteusmäärän tiivistymisen seinärakenteisiin. [47, 49]

Vesihöyrynpitoisuudet saadaan laskettua suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuksien avulla. Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus on riippuvainen vesihöyrynpaineesta  $p_{sat}$ . Vesihöyrynpaine  $p_{sat}$  lämpötilan funktiona saadaan yhtälöstä

$$p_{sat} = \begin{cases} 610,5e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}}, & \theta \geq 0^\circ\text{C} \\ 610,5e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}}, & \theta < 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (38)$$

jossa

$\theta$  on lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]

Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus  $v_{sat}$  lasketaan ideaalikaasun tilanyhtälön avulla

$$v_{sat} = \frac{p_{sat}}{R_v T} \quad (39)$$

jossa

$R_v$  on kaasuvakio 462 J/(kgK) ja

T on lämpötila [K].

Suhteellinen kosteus kertoo vesihöyrypitoisuuden määrän suhteessa vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuteen  $v_{sat}$ . Sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuteen vaikuttaa muun muassa sisäilman kosteuslisä, mitä aiheutuu rakennuksen käyttöön liittyvistä toiminnoista, jotka synnyttävät vesihöyryn pitoisuuseroja eri rakenteiden välillä. Suihkussa käynti ja ruoan laitto sisätiloissa kasvattaa sisätilan kosteuspitoisuutta verrattuna ulkoilmaan. Vesihöyryn kosteuseroja voidaan kuvata myös vesihöyryn osapaine-eroina. Sisätiloissa oleva vesihöyryn kosteuslisä pyrkii tasoittumaan julkisivurakenteen läpi ulkoilmaan diffuusion avulla. Diffuusio on sitä suurempi, mitä suurempi on sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuusero. [25, 49]

Sisäilman kosteuslisä on suurin talvella, koska kosteuden tuotto on silloin suurimmillaan. Sen lisäksi kylmään ulkoilmaan ei mahdu niin paljoa kosteutta kuin sisäilmaan. Yli  $0^\circ\text{C}$  lämpötiloissa rakenteiden ulko-osat ovat alttiita homeen ja mikrobin kasvulle. Kosteuden kondensoitumisen ja homeenkasvun kannalta kriittisin tarkastelukohta julkisivurakenteissa on lämmöneristeen ulkopuolella olevan tuulensuojan tai ulkoverhouksen sisäpinta. Liian suuri suhteellinen kosteus aiheuttaa kondensoitumisen ohella myös muun muassa raudoitteiden ruostumista, materiaalien värimuodonmuutoksia, maalien ja pinnoitteiden irtoamista ja puurakenteissa lahovaurioita. Vesihöyryn liiallinen kulkeutuminen rakenteisiin ja siitä aiheutuvat kosteusvauriot tulee estää asettamalla vesihöyrytiivis kerros lämmöneristeiden ja lämpimän sisätilan väliin. Tällöin vesihöyrynläpäisevyys seinärakenteessa pienenee kuljettaessa lämpimästä tilasta kylmempään tilaan. [25]

Huokoiset materiaalit, kuten tiili ja betoni, sitovat kosteutta ollessaan yhteydessä kosteutta sisältävään ilmaan. Vesimolekyylit kiinnittyvät huokosseinämiin absorptiolla. Kosteuden sitoutuminen aineeseen johtuu tyhjästä huokostiloista, joihin vesimolekyylit kulkeutuvat. Huokosten koko, muoto, määrä ja huokosjärjestelmän jatkuvuus vaikuttavat materiaalin imemään kosteuden määrään ja nopeuteen. [50]

## 5.2.2 Vesihöyryn konvektio

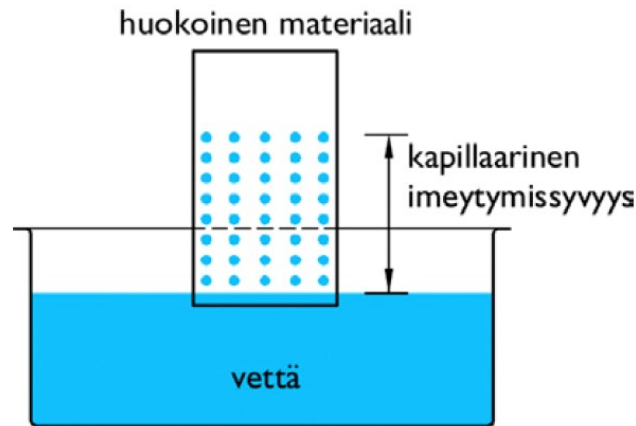
Konvektiolla tarkoitetaan rakenteen sisä- ja ulkotilan välisistä ilmanpaine-eroista aiheutuvaa ilmavirtausta. Vesihöyryn konvektio tapahtuu samoin kuin lämmön konvektiokin, jolloin lämmön siirron konvektiotarkastelut ovat samanlaisia myös kosteuskonvektion kanssa. Konvektio voi esiintyä joko luonnollisena tai pakotettuna konvektiona. Luonnollisessa konvektiossa kosteus siirtyy konvektiolla ilman tiheyserojen vuoksi, kun taas pakotetussa konvektiossa kosteus siirtyy ilmanpaine-erojen vuoksi rakenteessa olevien rakojen ja reikien kautta lämpimämmästä sisätilasta ulkotilaa kohti. Rakenteissa olevat paine-erot syntyvät tuulen, ilman lämpötilaerojen tai ilmanvaihdon vaikutuksista. Ilmavirtauksen määrä on riippuvainen rakenteessa olevan rakojen määrästä, ilmanpaine-eroista ja rakojen virtausvastuksesta. Rakojen virtausvastus on riippuvainen muun muassa raon geometriasta, leveydestä, syvyydestä ja pintojen epätasaisuudesta. [13, 17, 18, 20]

Vesihöyry on ilman osakaasu ja siirtyy ilmavirtausten mukana rakenteessa joko epäpuhtauksien avulla tai tuulen vaikutuksesta. Epäpuhtauksien ympärille tiivistyy vettä ja muodostuneet vesipisarat siirtyvät epäpuhtauksien mukana tai tuulen siirtämänä rakenteeseen. Kosteuden kulkeutumista ilmavirran mukana kutsutaan kosteuskonvektioksi, mistä aiheutuvaa kosteusvaurioriskiä arvioidaan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan avulla. Kosteuskonvektiolla on rakennetta kuivattava vaikutus, kun ilma lämpenee kulkeutuessa rakenteen läpi tai kun ilman kyllästyskosteuspitoisuutta ei ole saavutettu. Kosteuskonvektio on haitallista ja rakennusten kosteusvaurioriski muodostuu, kun kylmällä ilmalla ilma jäähtyy virratessaan rakenteen läpi ja kosteus tiivistyy seinärakenteeseen ilman jäähtyessä alle kastepisteen. [47]

Suomessa asuinrakennukset suunnitellaan hieman alipaineisiksi, jotta kosteuskonvektion aiheuttama rakenteiden kosteusvaurioituminen saadaan ehkäistyä. Tällöin ilman virtausuunta on kylmästä ulkoilmasta sisätilaan päin. Vanhoissa rakennuksissa alipaineisuutta tulisi tehostaa, jotta ilma kulkisi ulkoa sisälle, eikä lämpimästä sisätilasta ulospäin lisäten rakenteiden vaurioitumisriskiä. [13]

## 5.2.3 Veden kapillaarinen siirtyminen

Veden kapillaarisessa siirtymisessä vesi kulkeutuu pääasiassa pintajännitysvoimilla huokosalipaineen vaikutuksesta, kun materiaali on kosketuksissa vapaaseen veteen tai toiseen materiaaliin. Veden kosteus siirtyy sille korkeudelle, missä painovoima ja huokosalipaine ovat tasapainotilassa. Periaatekuva kapillaarisen veden siirtymisestä huokoisessa materiaalissa on esitetty kuvassa 16.



*Kuva 16. Kapillaarisen veden siirtyminen huokoisessa materiaalissa [13].*

Materiaalin kosteuspitoisuus voi olla kapillaarisella kosteusalueella ollessaan kosketuksissa myös toiseen materiaaliin, esimerkiksi maaperään tai kun materiaalissa on rakennuskosteutta. [44]

Kapillaarisen veden siirtymisessä huokosalipaineen suuruuteen vaikuttaa materiaalien huokoskoko, sillä pienemmillä huokosilla huokosalipaine on suurempi verrattuna suurempiin huokosiin eli mitä pienempi huokoskoko on, sitä korkeammalle vesi kapillaarisesti nousee rakenteessa. Lisäksi veden virtausta vastustavat kitkavoimat vaikuttavat veden kapillaariseen siirtymiseen. Kitkavoimat ovat kääntäen verrannollisia huokoskoon suuruuteen ja suoraan verrannollisia veden virtausmatkaan. Veden tunkeutumissyvyudeksi määritellään veden korkeus, missä kaikki materiaalin huokokset ovat kapillaarisesti täyttyneet vedellä. Kuvan 2 kapillaarinen imeytymissyvyys havainnollistaa veden tunkeutumissyvyyttä. Vesi voi siirtyä kapillaarisesti sekä pysty- että vaakasuuntiin. Veden tunkeutumissyvyys voidaan määrittellä kaavalla

$$X = B\sqrt{t} \quad (40)$$

jossa

X on veden tunkeutumissyvyys metreinä ja

B on tunkeutumiskerroin ja t on aika. [47]

Vesi ei yleensä siirry suurimpaan kapillaariseen nousukorkeuteen asti, vaan veden korkeus on riippuvainen rakenteen pinnoilta haihtuvan kosteustasapainon kanssa. Haihtumisenopeuteen vaikuttaa rakenteen pintojen kosteudenläpäisevyys, ja kapillaarisesti siirtyvän vesimäärän suuruus on riippuvainen rakenteen poikkileikkauksesta. Suurella poikkileikkauksella kapillaarisesti siirtyvän veden määrä on suurempi suhteessa rakenteen pinnoilta haihtuvan kosteuden määrään. [5]

## 5.2.4 Veden painovoimainen siirtyminen

Maan vetovoiman vuoksi vesi kulkeutuu ulkoseinärakenteissa alaspäin rakennuksen pystysuoria ja kaltevia pintoja pitkin. Yksi ulkoverhouksen takana olevan ilmaraon tärkeimpiä tehtäviä on kuljettaa rakenteisiin kulkeutunut sadevesi hallitusti pois. Jos vesiä ei ohjata hallitusti rakenteesta pois, voi vesi kulkeutua painovoimaisesti rakenteiden sisään aiheuttaen ajan myötä kosteusvaurioita. Kosteusvaurioriski on huomattava, koska painovoimaisesti rakenteisiin siirtyvät vesimäärät ovat yleensä suuria. Kapillaarisesti vettä imevillä materiaaleilla painovoimaisen veden siirtymisen merkitys on vähäisempi, koska kapillaarivoimat ovat hallitsevampia kuin painovoimainen veden siirtyminen rakenteissa. Karkearakeisissa materiaaleissa, kuten sepelissä, painovoimainen veden siirtyminen on kuitenkin mahdollista, vaikka materiaali olisi huokoinen ja toimisi kapillaarisesti. [5, 47]

Suurin osa ulkoseinärakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta ja veden siirtymisestä tapahtuu painovoimaisen veden siirtymisen avulla. Kaltevilla pinnoilla, kuten sadevesikouruissa ja salaojissa, painovoimainen veden siirtyminen on usein toivottua, toisin kuin seinärakenteessa olevien rakojen mukana tai elementtisaumojen kautta kulkeutuva sadevesi. Kapillaarisesti vettä imevissä huokoisissa materiaaleissa, kuten betonissa ja tiilessä, veden painovoimainen siirtyminen on vähäistä suhteessa kosteuden kokonaissiirtymiseen, ja veden painovoimaista siirtymistä esiintyy lähinnä halkeamien ja saumojen kohdilla. [47]

## 5.3 Ilmavirtaus rakennuksessa

Ilmalla on kyky sitoa kosteutta, joten ilmavirtaukset vaikuttavat oleellisesti rakenteissa oleviin kosteuspitoisuuksiin. Rakennusten paine-erot ja julkisivurakenteiden ilmatiiveys vaikuttavat rakennusten ilmavirtauksiin. Ilma virtaa rakennuksessa korkeammasta paineesta matalamman paineen eli ylipaineesta alipaineen suuntaan. Rakennusten paineeroihin vaikuttavat ilmanvaihto, tuuli ja ilman lämpötilaerot. Ilmavirtaukset kuljettavat mukanaan vesihöyryä ja ilman epäpuhtauksia, mikä aiheuttaa kosteuden kertymistä rakenteisiin ja muun muassa homeen hajun kulkeutumista rakenteista. [51, 52]

### 5.3.1 Ilman ominaisuudet

Ilma on kaasuseos, jossa on pääasiassa typpeä ja happea. Ilma ympäröi rakenteita ja rakenteissa olevissa raoissa ja huokosissa on myös ilmaa, joten ilman ominaisuuksilla on vaikutusta rakenteiden toimintaan. Kosteusteknisesti tärkein tekijä on ilman kyky sitoa kosteutta eri tavalla eri lämpötiloissa. Mitä suurempi lämpötila on, sitä enemmän ilma sitoo kosteutta ja kuljettaa sitä rakenteisiin. Ilman kosteutta määritetään absoluuttisella kosteudella tai suhteellisen kosteuden avulla. Absoluuttinen kosteus kertoo, kuinka paljon ilmassa on kosteutta grammoina kuutiometriä tai kilogrammaa kohden. Suhteellinen kos-

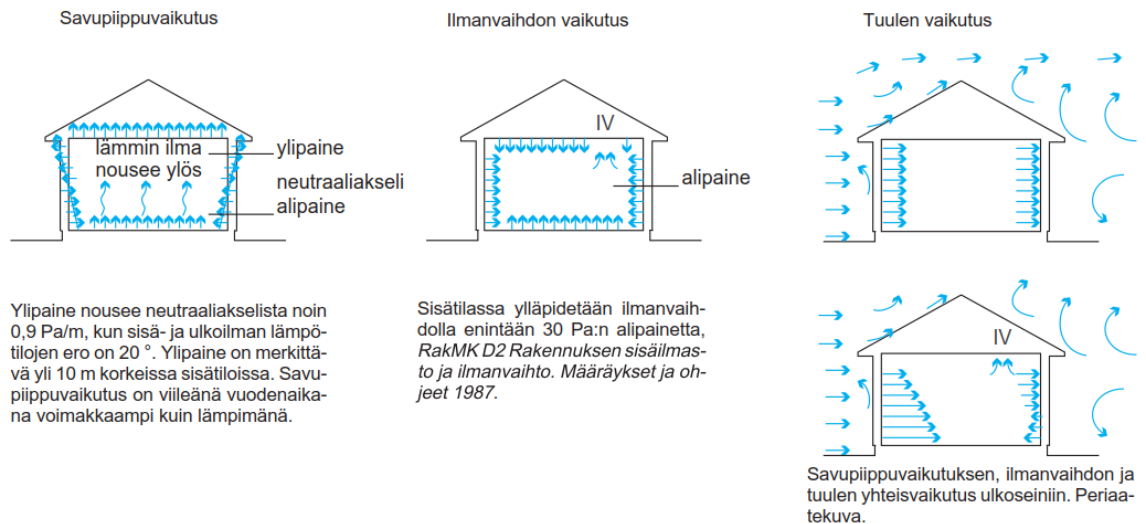
teus, RH relative humidity, mikä kuvaa ilmassa olevaa kosteuspitoisuutta suhteessa maksimikosteuspitoisuuteen prosentteina. Suuremmilla lämpötiloilla maksimikosteusmäärä on suurempi kuin alhaisemmalla lämpötilalla. [52]

### 5.3.2 Rakennuksen paine-erot

Rakennuksen paine-erot muodostuvat tuulen, ilman lämpötilaerojen tai ilmanvaihdon vaikutuksesta, ja yleensä paine-ero on syntynyt näiden yhteisvaikutuksesta. Konvektiossa ilma virtaa rakenteiden läpi ilman kokonaispaine-erojen seurauksena. Normaali ilman kokonaispaine on 101325 Pa ja 10 mm korkea vesipatsas vastaa 100 Pa painetta. Ilma virtaa suuremmasta paineesta pienempään huokoisten materiaalien, halkeamien ja rakojen läpi. Virtaavan ilmamäärän suuruus on riippuvainen paine-erojen suuruudesta, materiaalin ilmanläpäisevyydestä ja rakenteessa olevien rakojen virtausvastuksesta. [52]

Rakennuksen paine-eroihin vaikuttavat ilmanvaihto, ilman lämpötilaerot ja tuuli. Ilmanvaihtojärjestelmän säädöillä pystytään vaikuttamaan rakennuksen paine-eroihin. Epäpuhtauksia kulkee rakenteisiin tyypillisesti, kun ilmanvaihtona toimii koneellinen poistoilmanvaihto eikä korvausilmaa rakennukseen ole suunniteltu. Tällöin suurin osa korvausilmasta voi kulkeutua esimerkiksi alapohjarakenteiden läpi aiheuttaen epäpuhtauksien kulkeutumisen rakennuksen sisälle. Ilman lämpötilaerot vaikuttavat suoraan rakennuksen paine-eroihin, ja mitä suurempi lämpötilaero on, sitä suuremmaksi rakennuksen paine-erot myös muodostuvat. Rakennuksen alaosaan muodostuu alipainetta ja yläosaan ylipainetta. Tuulen vaikutus paine-eroihin on satunnainen, joten tuulen aiheuttama rakennukseen kohdistuva paine on riippuvainen tuulen nopeudesta, suunnasta ja rakennuksen geometriasta. Korkeammissa rakennuksissa tuulen vaikutusta joudutaan ottamaan huomioon enemmän kuin matalammissa rakennuksissa. Tuulelle kohdistuvaan pintaan muodostuu ylipainetta ja suojan puoleiselle seinälle alipainetta. [53]

Ilmanpaine-eroihin vaikuttavat lämpötilaerot ja siitä aiheutuva savupiippuvaikutus, ilmanvaihto ja tuuli. Kuvassa 17 on esitetty paine-erojen, ilmanvaihdon ja tuulen vaikutusta rakennuksessa.



**Kuva 17.** Savupiippuvaikutus ilmenee, kun lämmin ilma nousee rakennuksessa ylöspäin. Ilmanvaihdolla saadaan huonetila alipaineiseksi. Tuulenpaine lisää tuulenpuoleisen ulkoseinän sisäpinnalla alipainetta ja tuulensuojaisella seinällä ylipainetta [54].

Lämmin ilma nousee huonetilassa kylmempää ilmaa kevyempänä ylöspäin, jolloin rakennukseen muodostuu lämpötilavaihteluista tiheyseroja. Tiheyserot muodostavat rakennuksen yläosaan ylipainetta ja alaosaan alipainetta. Tätä kutsutaan savupiippuvaikutukseksi. Neutraaliakselilla rakennuksessa sisällä on sama ilmanpaine kuin ulkoilmassa oleva ilmanpaine. Ilmanvaihdon avulla saadaan huonetila alipaineiseksi ja ylläpidettyä huone hieman alipaineisena. Tuulenpaine aiheuttaa tuulenpuoleiselle ulkoseinän sisäpinnalle alipainetta ja tuulensuojaiselle seinällä ylipainetta. Ylipaineisen seinän kohdalla ilmavuodot ovat haitallisia, koska ilman mukana rakenteisiin kulkeutuu vesihöyryä. Jotta kosteusvaurioilta välttyttäisiin, ilmanvaihdon avulla ylläpidetään sisätilaa hieman alipaineisena ulkoilmaan nähden. Jos ilmansulussa on ilmavuotokohtia, kuten rakoja tai halkeamia, tai sisätila on ylipaineinen, kulkeutuu ilmavirtauksen mukana rakenteisiin vesihöyryä. Jos vesihöyry kondensoituu rakenteiden kylmässä osassa, siinä voi kasvaa mikrobeja aiheuttaen helpommin rakenteiden homehtumisen. [54]

Rakennuksen paine-eroihin vaikuttaa ilmanvaihdon, ilman lämpötilaerojen ja tuulen lisäksi rakennuksen epätiivius ja epätiiviuskohdista ilman virtaaminen rakenteiden läpi. Tyypillisimpiä epätiiviiin rakenteen ilmavirtausreitit ovat rakenteiden halkeamat, saumat, läpiviennit ja tarkistusluukut. Jos rakennuksen tuulenpuoleinen seinä on muita seiniä epätiivimpi, muodostuu rakennuksen sisälle ylipainetta. Sisätilassa on alipainetta, jos epätiivimmät seinät ovat suojan puolella eikä tuuleen kohdistuvalla seinällä. [53]

### 5.3.3 Sisäkuoren ilmatiiveys

Rakennuksen sisäilman laadun ja energiatehokkuuden kannalta rakennuksen vaipan on oltava ilmatiivis [26]. Seinärakenteen tulee olla ilmatiivis, eikä ilmanpitävyys saa heikentyä rakennuksessa ajan kuluessa muodonmuutosten, taipumien tai materiaalin vanhentumisen takia [5]. Kun parannetaan seinärakenteen ilmatiiviyttä, saadaan energiakulutusta vähennettyä sekä estettyä kosteuskonvektio ja epäpuhtauksien kulkeutuminen ilmavirtausten mukana. Sen lisäksi asumisviihtyvyys paranee, kun vedontunne sisätiloissa vähennee ja ilmaääneneristävyyden voi myös parantua. [13]

Kuvassa 18 on esitetty epätiivis tiilirunkoinen sisäkuori.



*Kuva 18. Epätiivis tiilisisäkuori.*

Tiili on paikoitellen halkeillut ja etenkin saumauksen kohdilla on suurehkoja ilmavuoto-kohtia. Epätiivis sisäkuori aiheuttaa lämmön ja kosteuden siirtymistä rakenteen läpi ilmavuotokohdista. Rakennuksen ilmatiivyyttä huomioitaessa on vältettävä riskialttiita rakenteiden liitosratkaisuja ja minimoitava läpivientien määrä. Maaperästä kulkeutuva radon tai homeen haju voi kulkeutua sisätiloihin pienistäkin seinärakenteiden ilmaraoista. Pienet ilmaraot edesauttavat myös sisäilman kosteuden siirtymistä rakenteisiin. [5]



Seinärakenteiden läpi ilmarakojen kautta siirtyvän ilman estämisen hallitsemiseksi seinärakenteessa on oltava yksi ilmansulkukerros, joka laitetaan usein lämmöneristeiden lämpimämmälle puolelle. Ilmansulkukerros voi olla kivirakenne, kalvo tai levy, mutta myös tiiviisti saumattu lämmöneristekerros voi toimia ilmansulkuna. Usein ilmansulku toimii samalla höyrynsulkuna sisäilman kosteudelta. Tuulensuojaan verrattuna ilmansulkukeroksella täytyy olla kymmenkertainen ilmatiiveys verrattuna tuulensuojakerroksen ilmanläpäisykykyyn. Ilmansulkukalvot tulee asettaa rakenteisiin limittäin ja puristaa jäykkien rakenteiden väliin. Ilmansulkukalvojen saumat tiivistetään esimerkiksi saumavaahdon tai tiivistysmassan avulla. Mitä joustavampaa tiivistysmateriaali on, sitä paremmin saadaan vältettyä lämpötilan ja kosteuden muutoksista aiheutuvat halkeamat. [5]

Vaipan ilmatiiveyden ansiosta ilman epäpuhtaudet eivät pääse vaipan läpi rakennuksen sisätiloihin. Elementtien saumojen huolimaton valaminen tai juotosbetonin kutistuminen saattaa aiheuttaa ilmapuotoja epätiivien saumojen kautta. Valusaumoja voidaan tiivistää ruiskubetonoinnilla tai rappaus- ja oikaisulaasteilla. Kun rakennuksen vaippa on riittävän ilmatiivis, estetään kosteuden kulkeutuminen sisäilmasta seinärakenteeseen ja epäpuhtauksien kulkeutuminen rakenteen läpi sisäilmaan. Lisäksi kun julkisivurakenne on ilmatiivis, pystytään paremmin hallitsemaan taloteknisiä järjestelmiä ja ylläpitämään riittävät sisäilmaolosuhteet. Ilmatiiviin rakenteen vaikutus rakennusten energiatehokkuuteen on myös merkittävä. [23, 26]

Ilmatiiveyttä voidaan parantaa muun muassa erilaisten läpivientien yhteydessä, ikkuna- ja oviliitoksissa, rakenteiden välisissä liitoksissa sekä elementtien ja rakenteiden saumakohdissa ja liitoksissa. Vanhan säilytettävän rakenteen ilmatiiveyttä voidaan parantaa korjausten yhteydessä muun muassa polyuretaanivaahdolla, elementtisaumoihin asennettavalla bitumikermillä, ilmatiiviillä lämmöneristekerroksella tai elastisilla massoilla. [23]

### **5.3.4 Ilmavirtausten vaikutus lämmön ja kosteuden siirtymiseen**

Ilmavirtaukset kuljettavat mukanaan kosteutta. Huoneilman kosteus on riippuvainen ulkoilman ja sisäilman kosteudesta ja tilan ilman vaihtuvuudesta [55]. Ilmavirtaus ja sen mukana kulkeva kosteus siirtyy rakenteeseen huokoisten materiaalien tai rakenteessa olevien rakojen ja halkeamien läpi konvektion avulla. Vesihöyryn konvektio heikentää rakenteiden lämmöneristyskykyä. Lisäksi ilmavirtaus vaikuttaa rakenteisiin kahdella tavalla, kun ilma joko jäähtyy tai lämpenee kulkiessaan rakenteen läpi. Ilma jäähtyy ilman virratessa rakenteessa sisältä ulos. Tällöin kosteus saattaa tiivistyä ja kerääntyä rakenteeseen. [50]

Ulkoa sisälle päin mentäessä ilma lämpenee ilman virratessa rakenteen läpi. Ilmavirtaus kuivattaa rakennetta, koska ilman kosteuden sitomiskyky kasvaa lämpötilan funktiona. Ulkoilman virtaaminen voi kuitenkin jäähdyttää rakennetta paikallisesti, mikä aiheuttaa

sisäilman vesihöyryn kondensoitumista rakenteisiin. Paikallinen jäähtyminen nostaa rakenteen suhteellista kosteutta korkeammaksi aiheuttaen haitallista suhteellisen kosteuden nousua rakenteiden tai höyrynsulkukerroksen sisäpintaan. [50]

### 5.3.5 Ilmavirran määrittäminen halkeamissa

Kosteuden konvektiota tapahtuu rakojen, halkeamien ja huokoisten materiaalien kautta. Halkeamien kautta kulkeutuva kosteuden konvektio on merkityksellisempi verrattuna huokoisten materiaalien läpi tapahtuvaan kosteuden konvektioon. Halkeaman kautta kulkevaa ilmamäärää arvioidaan eri tavalla halkeamien ollessa paksussa tai ohuessa rakenteessa. Julkisivurakenteiden tapauksessa tarkastellaan halkeamien läpi kulkevaa ilmavirtaa paksuissa rakenteissa. Kun ilman virtaus on laminaarista, konvektion aiheuttama ilmavirta  $Q$  [ $\frac{m^3}{s}$ ] paksun rakenteen läpi lasketaan kaavasta 41

$$Q = A \frac{b^2}{12 * \eta} \frac{\Delta p}{L} \quad (41)$$

jossa

A halkeaman pinta-ala ja  $A=b*d$ ,

b on halkeamaleveys

d halkeaman pituus

$\eta$  on ilman viskositeetti [ $Ns/m^2$ ]

$\Delta p$  on ilman paine-ero rakenteen eri puolilla ja

L on halkeaman syvyys eli rakenteen paksuus.

Ilman viskositeetti lasketaan kaavan 42 avulla

$$\eta = (17,1 + 0,049 * t) * 10^{-6} \quad (42)$$

jossa t on lämpötila [ $^{\circ}C$ ]. [20]

Halkeamien kautta siirtyvä kosteusvirta voidaan ratkaista kaavasta 43

$$g_{konv} = v * Q \quad (43)$$

jossa

$g_{konv}$  on konvektion aiheuttama kosteusvirta ja

v on ilman vesihöyrypitoisuus.

Kosteusvirran avulla voidaan päätellä, mikä on haitallinen ilmavirran määrä. Mitä enemmän ilmaa virtaa halkeamien läpi, sitä enemmän vesihöyryä kulkeutuu rakenteisiin. Lopulta riittävän vesihöyryn siirtymisen seurauksena liiallinen kosteus voi kerätä rakenteisiin vettä, jos ylitetään 100% RH suhteellisen kosteuden arvo. [20]

## 6. RAKENTEELLINEN PALOTURVALLISUUS

Ulkoseinärakenteille on asetettu lämpö- ja kosteustekniikan ja ääneneristysvaatimusten lisäksi paloteknisiä vaatimuksia. Rakenteellisen paloturvallisuuden avulla varmistetaan rakenteiden kantavuuden säilyminen kantavien ja osastoivien seinien palonkestävyydellä. Palo-osastointi tarkoittaa rakenteita, joiden avulla estetään palon leviäminen rakennuksessa. Osastoivien rakenteiden avulla jaetaan rakennus pienempiin paloalueisiin palomääräysten mukaisesti. Palo-osastointi on yksi tapa suojata rakennusta palolta passiivisella palosuojauksella. Kantavien ulkoseinien osalta noudatetaan palonkestävyydessä Ympäristöministeriön asetusta rakennusten paloturvallisuudesta. [2, 15, 55, 56]

Palon syttymisen vaaran rakennuksessa täytyy olla mahdollisimman vähäinen [2]. Palon syttyminen vaatii palavan aineen, happea ja korkean lämpötilan. Syttyminen tapahtuu, kun syttyvä kappale on riittävän korkeassa lämpötilassa, mutta palon lämmönlähteenä voi olla myös kipinä tai liekki. Palamisen reaktionopeus voi olla räjähdysmäinen tai aineen yhtyminen happeen voi tapahtua hitaasti. [42]

Rakennukset jaetaan neljään eri palotekniseen luokkaan, ja paloteknisen luokan määrittymiseen vaikuttaa muun muassa rakennuksen kerrosten lukumäärä, käytetyt rakennusmateriaalit ja rakennuksen käyttötarkoitus. Vanhan rakennuksen paloluokkaa määritettäessä rakennuksen kerrosluokka on tärkein palotekniseen luokkaan vaikuttava tekijä. Paloluokat ovat P0, P1, P2 ja P3, joista P3 on vähiten vaativa paloluokka sisältäen korkeintaan kaksikerroksiset rakennukset. P2-luokan rakennukset ovat 2-8 kerroksisia rakennuksia ja P1-luokan rakennuksissa ei ole kerrosrajoituksia. P0-luokkaa käytetään, kun rakennus suunnitellaan käyttämällä suurilta osin tai kokonaan oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menetelmää. Suojaustason nostolla, kuten sprinklereillä ja palovaroittimilla, voidaan lieventää rakennukseen kohdistuvia palomääräyksiä. [2, 57]

### 6.1 Korjausrakentamisen paloriskit

Korjausrakentamisessa paloriskit ovat suuret, ja paloriskin pienentäminen on erityisen tärkeää. Uudisrakentamisen paloriskit ovat korkeammat rakentamisvaiheessa verrattuna rakennuksen normaaliin käyttöön, mutta korjausrakentamisessa paloriski kasvaa entisestään uudisrakentamiseen verrattuna. Paloriskiä saadaan pienennettyä huolehtimalla yleisestä järjestyksestä ja siisteydestä, jolloin korjaustyömaan palokuormaa saadaan vähennettyä. Julkisivua purettaessa työmaalle kertyy suuria määriä palavaa materiaalia, minkä vuoksi kasvaneen palokuorman vaikutukset paloturvallisuuteen täytyy huomioida. [11]

Kun vanhaa julkisivurakennetta puretaan, aiheutuu korjaustyömaalle pölyä, mikä kasvat-  
taa paloriskiä. Palavana aineena pöly tekee korjaustyömaakohteesta helposti syttyvän. Rakennusten palotekninen osastointi korjaustyömaakohteessa on hankalaa, varsinkin kun

rakennuksen piirustukset saattavat olla puutteelliset. Puu- ja sekarakenteisissa julkisissa rakennuspölystä ja purkujätteestä aiheutuva paloturvallisuusriski on erityisen suuri. Lisäksi pöly voi ilmaan sekoittuessaan aiheuttaa räjähdyksen, minkä vuoksi korjauskohteet, joissa julkisivut puretaan, luokitellaan räjähdysvaarallisiin kohteisiin. [11]

## 6.2 Lämmönsiirto tulipalossa

Tulipalotilanteessa lämpö siirtyy rakenteissa säteilemällä, johtumalla tai konvektiolla. Tulipalossa kehittynyt lämpö saattaa johtua tilasta toiseen esimerkiksi seinärakenteen läpi menevien metalliputkien välityksellä. Toisaalta hyvin lämpöä johtavan materiaalin pinta syttyy myöhemmin palamaan, koska se pystyy johtamaan lämpöä tehokkaammin muualle rakenteisiin verrattuna materiaaleihin, joilla on pienempi lämmönjohtavuus. [42]

Palotilanteessa lämpöä siirtyy myös konvektiolla kuumien kaasujen virtausten mukana. Palamisessa syntyneet kuumentuneet kaasut saattavat sytyttää kaukana palopesäkkeistä olevia herkästi syttyviä kohteita, kun kuumat kaasut kulkeutuvat ympäröivää ilmaa kevyempänä palopesäkkeen yläpuolelle ja kulkeutuvat konvektiolla kauemmaksi palon alkuperäisestä lähteestä. Jos hapensaanti on palotilanteessa rajoitettua, konvektiolla virtaavat kaasut saattavat syttyä, kun hapen saanti kasvaa. Konvektion avulla tulipalo leviää erityisesti käytävien ja onteloiden kautta, koska kuumat kaasut eivät tällöin sekoitu ympäröivään ilmaan ja kaasut eivät laimene tai jäähdy ilman vaikutuksesta. Lisäksi palo voi levitä esimerkiksi palopatsaassa kulkevien kekäleiden tai palavien paperinpalojen välityksellä. [42]

Kolmas lämmönsiirtymisen muoto palotilanteessa on säteily. Lämmin kappale säteilee ympäristöönsä sähkömagneettista säteilyä, josta suurin osa on näkymätöntä infrapunasäteilyä. Kun kappale on lämmennyt tarpeeksi, näkyvän valon osuus kappaleen lämpösäteilyssä kasvaa. Säteily kulkee ilmassa lähes vaimentumatta ja jonkin verran myös läpinäkyvien materiaalien kuten lasin läpi. Mitä suurempi säteilyvirran tiheys, sitä suuremmaksi lämpötila kohoaa. Myös kuumat palamiskaasut sekä vesihöyryä, hiilidioksidia ja nokea sisältävät liekit säteilevät. [42]

## 6.3 Julkisivurakenteiden palosuojaus

Palosuojuksella tarkoitetaan kantavan tai osastoivan rakenteen pintaan kiinnitettyä verhousta tai pinnoitetta, joka lisää rakenteen palonkestoaikaa. Rakenteita palosuojataan palamattomilla tai palavilla materiaaleilla, ja usein palosuojuksella parannetaan teräsrakenteiden palokestävyyttä. Ympäristöministeriön rakennusten paloturvallisuutta koskevan asetuksen mukaan kantavien rakenteiden on säilytettävä kantokykynsä paloluokan määrittämän palonkestoajan minuuteissa. Jos henkilöturvallisuuden takia tai rakennuksessa tuhoutumisesta aiheutuvat vahingot ovat riittävän suuria, rakennuksen on riittävällä varmuudella kestävä sortumatta koko palokuorman palaminen sekä jäähtymisvaihe. Rakennuksen osastoivan rakennusosan täytyy säilyä ehjänä, eikä siihen voi syntyä reikiä,

halkeamia tai muita aukkoja, joiden läpi liekit tai kuumat palamiskaasut voisivat kulkeutua toiseen rakennuksen osastoon. [2, 42]

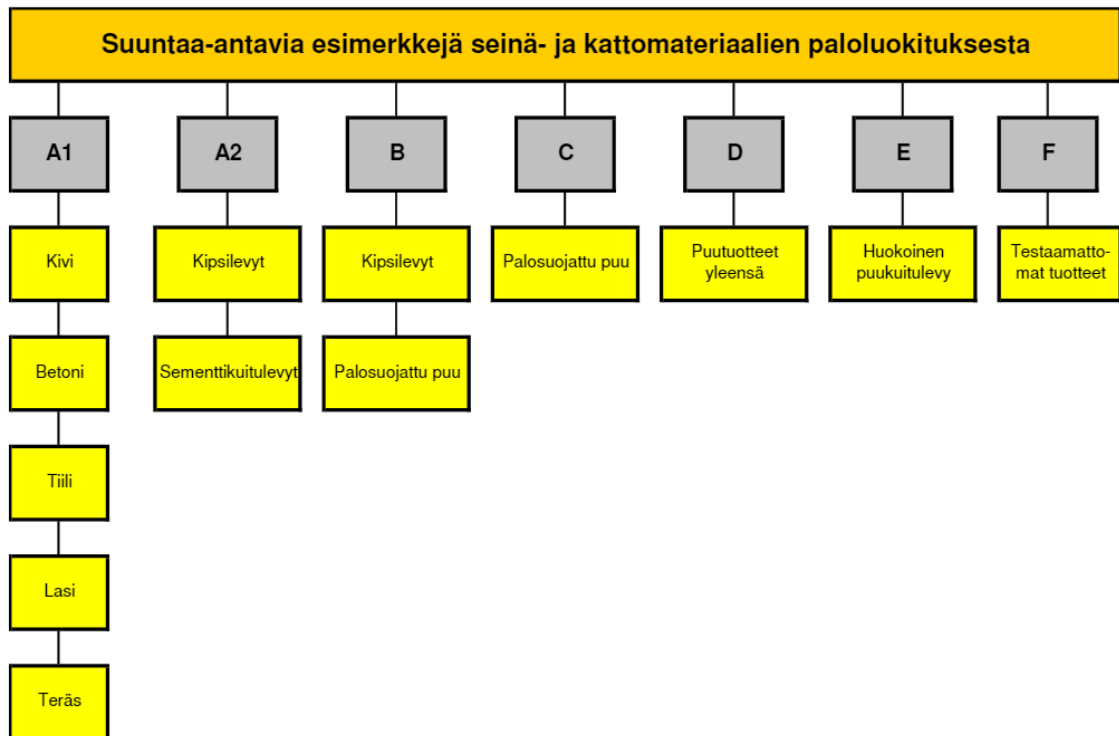
Seinien sisäverhousmateriaalin valinta vaikuttaa huomattavasti palon leviämiseen, vaikkei sisäverhousmateriaali todennäköisesti syty ensimmäisenä. Tuulettuvissa julkisivurakenteissa on ilmavirtausta, mikä voi edistää palon leviämistä huomattavasti, ja siksi on tärkeää suunnitella sisäverhousmateriaalit ja koko julkisivurakenne riittäväällä palosuojauksella. Sisäverhousmateriaaleissa tulee kiinnittää huomioita materiaalin syttymisherkyyteen ja materiaalin kykyyn luovuttaa lämpöä palaessaan. Rakennusmateriaaleille on tehty paloluokitukset, joissa on huomioitu materiaalin palo-ominaisuudet. Sisäverhouksen avulla pyritään estämään palon leviäminen sisätiloissa. [2, 55, 56]

Julkisivurakenteita koskevat palomääräykset liittyvät lähinnä julkisivussa käytettyihin rakennusmateriaaleihin ja julkisivurakenteen palokatkojen tarpeellisuuteen. Julkisivurakenteissa palomääräysten vaikutukset kohdistuvat lämmöneristeen, tuulensuojan ja levytyksen rankarakenteen materiaalivalintaan. Lisäksi palon vastakkaisen puolen seinärakenteen pintalämpötila ei saa nousta palon aikana liian korkeaksi. Pintalämpötilalle on asetettu kriittiset arvot, minkä yläpuolelle seinärakenteen lämpötila ei saa nousta. [26, 42]

Paloluokkien ja tiloihin vaadittavien materiaalien luokitusten avulla saadaan rakennuksiin suunniteltua paloturvallisempia vaihtoehtoja. Rakenteita verhotaan palosuojamateriaaleilla, jotta saavutetaan pidempiä palonkestoaikoja. Myös palokatkojen vaikutus täytyy ottaa huomioon julkisivurakenteissa paloturvallisuutta suunniteltaessa. Julkisivurakenteissa täytyy olla palokatkot, joilla estetään palon leviäminen osastosta toiseen. [2, 42]

### **6.3.1 Paloluokat ja materiaalien luokitukset**

Paloluokat rajoittavat rakennuksen kokoa ja käyttötapaa. Rakennuksen käyttötapaan liittyy laskennallisia määrityksiä rakennuksen palokuormasta, jonka mukaan rakennukselle asetetaan osastointivaatimukset. Rakennustuotteet jaetaan seitsemään luokkaan A1, A2, B, C, D, E ja F. Kuvassa 19 on esitetty seinä- ja kattomateriaalien paloluokat ja esimerkkejä niihin kuuluvista materiaaleista.



**Kuva 19.** Esimerkkejä seinämateriaalien paloluokituksista [58].

A1-luokkaan kuuluva materiaali ei vaikuta palamiseen, ja F-luokkaan kuuluva materiaali ei täytä E-luokan materiaalivaatimuksia tai sen palokäyttäytymisominaisuuksia ei tunneta. Luokissa A2-D käytetään myös savumuodostusominaisuuksia s1, s2 ja s3 ja palavien pisaroiden muodostumisesta luokkia d0, d1 ja d2. Luokassa E voidaan myös käyttää tarvittaessa pisaroiden muodostumisen lisämäärettä d2. [42]

Enintään kahdeksankerroksisissa P1-luokan rakennuksissa käytetään B-s1, d0 -luokan rakennusmateriaaleja. Jos käytetään tätä huonompia palosuojamateriaaleja, palon leviäminen eristeisiin, palo-osastosta toiseen ja rakennusten välillä tulee estää. Julkisivulevyjen kiinnityksessä voi käyttää pienissä määrin myös D-s2, d2 -luokan rakennusmateriaaleja. Yli kahdeksankerroksisissa P1-luokan rakennuksissa tuuletusvälin sisä- ja ulkopinnan tulee olla B-s1, d0 -luokan rakennusmateriaaleja, eikä levyjen kiinnittämiseen saa käyttää palosuojaukseltaan huonompia rakennusmateriaaleja. P2-luokan rakennuksissa tulee yleensä käyttää B-s1, d0 -luokan rakennusmateriaaleja. Jos rakennus on varustettu automaattisella sammutusjärjestelmällä ja jos ulkopuolisen palon leviäminen seinässä on estetty, voidaan rakennuksessa käyttää D-s2, d2 -luokan rakennusmateriaaleja. P3-luokan rakennuksissa käytetään yleensä B-s1, d0 -luokan rakennusmateriaaleja. P3-luokan rakennuksissa tuuletusvälissä käytetään D-s2, d2 -luokan rakennusmateriaaleja, mutta tuuletusvälin sisäpinnan rakennusmateriaaleille ei ole asetettu vaatimuksia. [26]

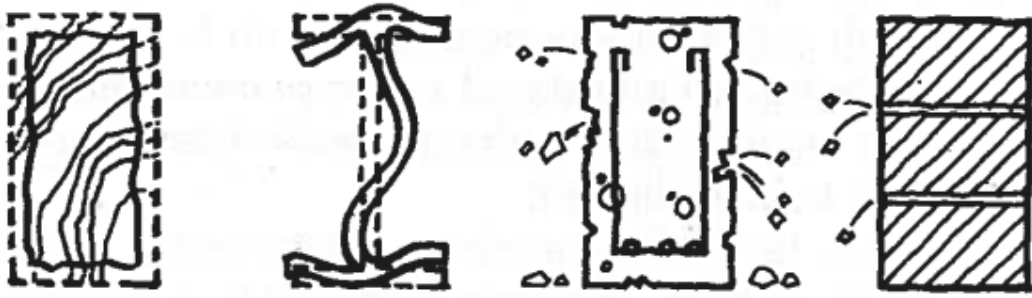
Muuratut tiiliseinät kuuluvat paloteknisen A-luokan rakennusosiin, sillä muurauskivet ja laastit ovat palamattomia rakennustarvikkeita. Palonkestävässä rakennuksessa kantavat

seinät toimivat osastoivina rakenteina. Paloa hidastavat ja paloa pidättävät rakenteet voidaan valmistaa myös palavista rakennusmateriaaleista tietyillä seinärakenteen sisäpintoja koskevilla rajoituksilla. Suojaverhouksen avulla rakenneosaa suojataan määrätyn ajan syttymiseltä, hiiltymiseltä tai palon aiheuttamalta vaurioitumiselta. Julkisivurakenteissa käytettävien palavien eristeiden ulkopinta täytyy suojata palamattomalla materiaalilla paloturvallisuuden parantamiseksi. Esimerkiksi polyuretaani on palava materiaali, joten julkisivurakenteissa ei voida käyttää ainoastaan polyuretaania lämmöneristeenä. Polyuretaanin ulkopuolelle laitetaan palamatonta mineraalivillaaeriste, jolloin polyuretaanin käyttö eristeenä on mahdollinen ja palava eristemateriaali on suojaverhottuna palovaatimusten mukaisesti. [2, 15, 42]

### 6.3.2 Palosuojamateriaalit

Materiaalista riippuen julkisivurakenteisiin käytettäviä materiaaleja joudutaan palosuojaamaan. Rakenteet voi olla suojattu lähes palamattomien materiaalien lisäksi myös palavilla palosuojamateriaaleilla, sillä myös palavat rakennusmateriaalit lisäävät alkuperäisen rakenteen palonkesto-aikaa. Esimerkiksi jos puurakennetta paksunnetaan palonkestävyyden lisäämiseksi, voidaan sitä pitää palosuojattuna rakenteena. Jos rakenteen täytyy olla palamattomista materiaaleista, tulee palosuojamateriaalinkin olla lähes palamatonta. Palamattomaksi rakennusmateriaaliksi luokitellaan materiaalit, jotka eivät kehitä savua tai palavaa kaasua lämpötilan kohotessa. Palava rakennusmateriaali ei täytä puolestaan palamattomalle rakennusmateriaalille asetettuja vaatimuksia. Teräsrakenteiden palosuojauksessa esimerkiksi teräksen palonkestokykyä voidaan parantaa palosuojauksen lisäksi myös kasvattamalla teräksen lämmönsitomiskykyä. Lämmönsitomiskyky paranee, kun teräsputki täytetään esimerkiksi betonilla tai vedellä. [42]

Kuvassa 20 on esitetty eri materiaalien käyttäytymistä palotilanteessa. Vasemman puoleisimmassa kaaviokuvassa on esitetty puun käyttäytyminen tulipalossa. Toinen vasemmalta kuvastaa teräksen, toinen oikealta betonin ja oikeanpuoleinen tiilen käyttäytymistä tulipalossa.



*Kuva 20. Kaaviokuvat puun, teräksen, betonin ja tiilen käyttäytymisestä tulipalossa [42].*

Puu osallistuu palavana aineena tulipaloon ja hiiltyy palamisen seurauksena ulkopinnastaan. Sisäosasta puun lujuus pysyy lähes ennallaan. Puun kantokyky säilyy niin kauan, kunnes kantava poikkileikkausala on hiiltynyt. Puun palosuojauksena käytetään rakenteellisen kantavuuden ylimitoittamista. Toisena vasemmalla kuvassa oleva teräs on palamaton materiaali, mikä ei edistä palon kehittymistä. Lämpötilan noustessa teräksen lujuus heikkenee. Lieskahduksen jälkeen lämpötila on niin suuri, että teräksen lujuus heikkenee huomattavasti, noin kolmasosaan ennen palolle altistusta. Lujuuden romahtaminen voi aiheuttaa teräsrakenteiden sortumisen, minkä vuoksi teräsrakenteet on yleensä palosuojattava. Teräksen ohella myös betoni on palamaton materiaali, mutta tulipalossa betonista saattaa lohkeilla paloja. Lieskahduslämpötilassa normaalilujuuksisen betonin lujuus alenee noin puoleen alkuperäisestä lujuudesta. Betonin lohkeilua voidaan estää ohuen ja tiheän raudoituksen avulla. Teräksen tavoin myös betonia voidaan palosuojata. Poltettu tiili on palamaton materiaali, koska se on valmiiksi poltettu ja kestää siten hyvin korkeita lämpötiloja. Kuitenkin tiilien saumat voivat rapautua ja reikätiilet lohkeilla palossa korkean lämpötilan ja sammutusvesisuihkun rasituksen takia. [42]

Teräksen palosuojausmateriaaliksi soveltuu esimerkiksi korkeita lämpötiloja kestävät mineraalivillat, vermikuliitti-, kalsiumsilikaatti- ja kipsilevyt. Terästen palosuojaus voidaan tehdä myös palosuojarappauksella tai mineraalikuturuiskutuksella. Suuria teräs-poikkileikkauksia suojatessa tulee huomioida myös rakenteen riittävä jäykkyys. Myös kipsilevyjä käytetään palosuojamateriaalina niiden rakenteessa olevan suuren kidevesimäärän vuoksi. Kipsilevyissä oleva kidevesi höyrystyy ja sitoo lämpöenergiaa. Kipsilevyjen palolta suojaava vaikutus loppuu, kun kaikki kidevesi on haihtunut. [42]

Palosuojamateriaalien lisäksi terästä voidaan palosuojata palosuojarappauksen tai mineraalikuturuiskutuksen avulla. Ruiskutuspaksuus on noin 10-40 mm riippuen suojaustarpeesta. Palosuojarappauksessa käytetään veden lisäksi laastien runkoaineena vermikuliittia tai perliittia ja sideaineena sementtiä, kalkkia tai kipsiä. Rappauksen paksuudet ovat mineraalikuturuiskutuksen tavoin 10-40 mm. Terästä voidaan lisäksi suojata betonilla ja erilaisilla palosuojamaaleilla. Betonin palosuojauskyky perustuu betonin suureen lämpökapasiteettiin. Palosuojamaalit muodostavat eristävää vaahtoa lämmön vaikutuksesta, ja



vahto eristää lämpöä. Kuitenkin vaahdon lämmöneristävyys ei ole riittävä pitkäaikaisissa tulipalorasituksissa, ja palosuojausajat ovat palosuojamaaleilla 30-60 minuutin luokkaa. [42]

## 6.4 Grenfell Towerin tulipalo

Julkisivurakenteiden paloturvallisesta suunnittelusta on case-esimerkkinä 24-kerroksinen Grenfell Tower, joka tuhoutui tulipalossa Lontoossa vuonna 2017. Grenfell Tower on esimerkki kerrostalosta, jossa julkisivurakenteiden suunnittelussa ei oltu huomioitu riittävästi rakenteiden paloturvallisuutta. Tulipalo sai alkunsa viallisen jääkaapin räjähdyksestä ja levisi julkisivurakenteita pitkin hetkessä koko tornitaloon aiheuttaen 79 ihmisen kuoleman. Grenfell Towerin tulipalo oli Iso-Britannian tuhoisin palo sataan vuoteen. [59]

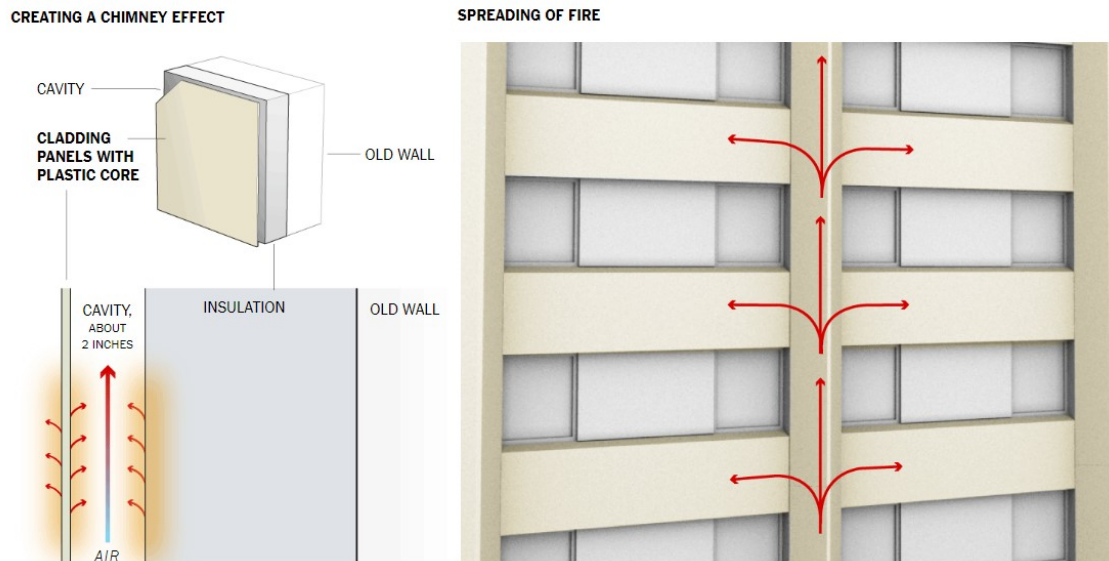
Kuvassa 21 on esitetty palava Grenfell Tower.



*Kuva 21. Liekkien ja savun ympäröimä Grenfell Tower [59].*

Grenfell Towerin julkisivuverhouksena oli helposti palavaa eristelevyä, mikä edesauttoi palon leviämisen koko rakennukseen palo-osastosta toiseen. Julkisivu oli verhoiltu paloherkällä alumiini-polyetyleenikomposiittilevyllä. Tulipalo ehti ylimpään kerrokseen 15 minuutissa, eikä kukaan ehtinyt pelastautua kerrostalon kolmesta ylimmästä kerroksesta. Kerrostalosta puuttui passiivisena palosuojausmenetelmänä toimiva sprinklerijärjestelmä. Komposiittieristelevy ei ollut paloturvallisuusmääräysten mukainen, ja koko kerrostalon paloturvallisuudesta huomioiminen oli ollut puutteellista säästösyistä. Julkisivuverhouksena piti alun perin käyttää sinkki-alumiinilevyä, joka vaihdettiin lopulta alumiini-polyetyleenikomposiittilevyyn rahallisten säästöjen takia. [59]

Kuvassa 22 on esitetty Grenfell Towerin julkisivurakenne.



**Kuva 22.** Julkisivurakenteen sisäkuoren pinnassa oli myrkyllisiä savukaasuja tuotava lämmöneriste ja tuuletusvälin jälkeen paloherkkä alumiini-polyetyleenikomposiittilevy. Tulipalo levisi tuuletusväliä pitkin kerroksesta ja huoneesta toiseen [59].

Julkisivurakenteen tuuletusvälin ulkopinnassa oli paloherkkä alumiini-polyetyleenikomposiittilevy ja sisäpuolella vähemmän paloherkkä lämmöneriste, joka kuitenkin levittää myrkyllisiä savukaasuja palaessaan. Julkisivun tuuletusväli toimi tulipalossa savuhormina levittäen palo kerroksesta toiseen. Julkisivujen korjaussuunnittelussa oli huomioitu ainoastaan rahallinen tekijä, ja julkisivurakenteeksi valittiin halvin vaihtoehto paloturvallisuuskriteereitä miettimättä. Julkisivurakenteessa pitäisi olla palokatkoja, jotka estävät palon leviämien palo-osastosta toiseen. Lisäksi materiaaleilla verhoiltua julkisivua rakennettaessa tulisi suuri palokuorman määrä huomioida suunnittelemalla paloturvallisempia korjausratkaisuja. Rakennusmateriaalit on luokiteltu paloluokkiin ja rakenteellinen palo-suojaus tulisi tehdä kohdekohtaisesti, eikä korkeissa tornitaloissa ei tulisi käyttää palavaa rakennusmateriaalia. Julkisivukorjauksien yhteydessä myös rakenteelliseen paloturvallisuuteen tulee kiinnittää huomiota rakennusfysikaalisen ja -akustisen toimivuuden lisäksi. [59]

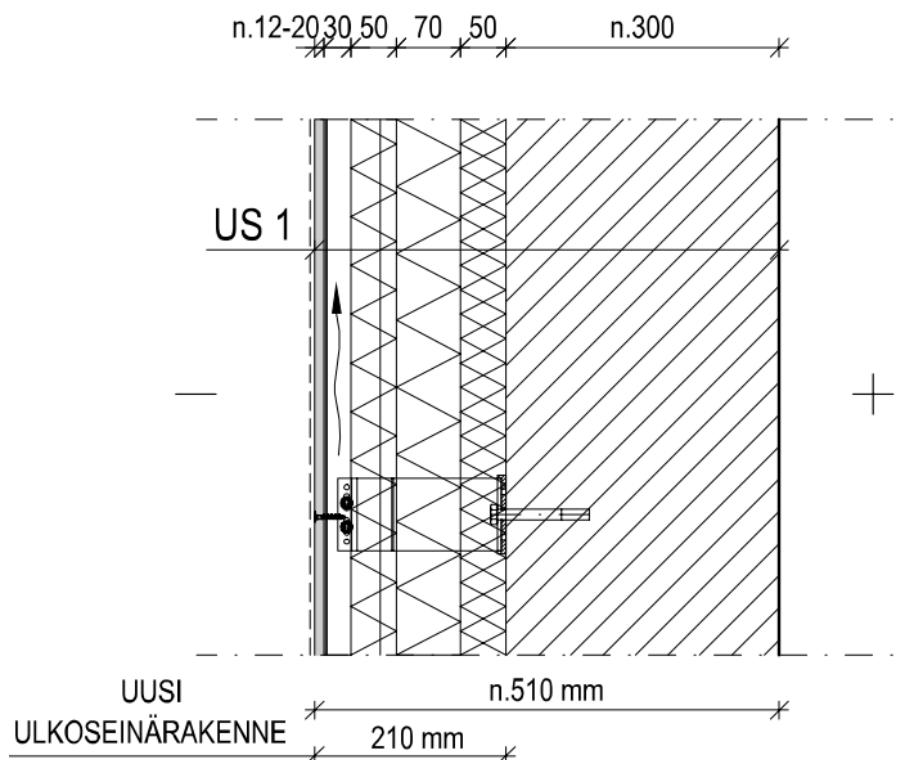
## 7. JULKISIVUN PURKU JA UUSIMINEN CASE-KOhteissa

Case-kohteiksi valittiin kaksi eri asuinkerrostaloa, joihin on tehty julkisivukorjaus purkamalla vanha julkisivu kokonaan sisäkuoreen asti ja korjaamalla uudella julkisivulla. Eri case-kohteiden välillä on eri materiaaliratkaisut julkisivurakenteille. Ensimmäisenä käsitellään tiilisisäkuorirakenteinen julkisivu, jota verrataan betonisisäkuorirakenteiseen julkisivuun. Molempien case-kohteiden rakennukset ovat 1940-60-luvun asuinkerrostaloja, joissa julkisivut on purettu sisäkuoreen asti. Lisäksi tarkasteltuja tehtiin tiili- ja betonisisäkuorirakenteilla ilman polyuretaanikerrosta.

### 7.1 Kohde 1, tiilimuurirunko


Tiilisisärunkoinen asuinkerrostalo on ensimmäinen case-kohde, johon verrataan betonisisärunkoista julkisivua ja kevyitä ulkoseinärakenteita. Kohteen julkisivut ovat pääosin maalattua sileää rappausta. Rappaus on noin 30 mm paksu, ja rappausalustana ja lämmöneristeenä toimiva kevytbetonimuuraus on 180 mm paksu. Kantava runko on noin 300 mm paksu tiilimuuri sekä betonipilarit ja -palkit.

Kuvassa 23 on esitetty tiilimuurirunkoisen julkisivun korjaustapa.



RAKENNE ULKOAPÄIN:

5-8mm	STOVENTEC LEVYRAPPAUS - laastit järjestelmätoimittajan mukaan - pinnoite STOLOTUSAN K raekoko 3,0 mm - hiertopinta, väri ARK
12mm	JULKISIVULEVY, STOVENTEC - ruuvi kiinnitys
>30mm	TUULETUSVÄLI + AL-PYSTYRANKA L-60x40 mm tai T-60x100 mm - Hilti Eurofox järjestelmä - kiinnitys itseporautuvilla ruuveilla 5.5x19 mm 2 kpl runkokiinnikkeisiin
170mm	LÄMMÖNERISTEET JA RUNKOKIINNIKKEET - TUULENSUOJAPINTAINEN MINERAALIVILLA 50mm (ISOVER RKL-31 Facade TAI PAROC CORTEX) - levysaumot teipataan - PEHMEÄ MINERAALIVILLA 70mm (ISOVER KL-36 TAI PAROC EXTRA) - RUISKUTETTAVA POLYURETAANI 50mm (Ekospray 40E) - RUNKOKIINNIKKEET MFT-MFI 185 M 11 mm - Hilti Eurofox järjestelmä - runkokiinnikkeet kiinnitetään tiilimuuraukseen / betonipilareihin kiinnikkeet tuotetoimittajan ohjeen ja alustatyyppin mukaan
n.300mm	VANHA TIILIMUURATTU SEINÄRAKENNE ULKOPINNAN PUHDISTUS KORJAUSTYÖSELOSTUKSEN MUKAAN

 UUDEN RAKENTEEN U-ARVO n. 0,17 W/m<sup>2</sup>K

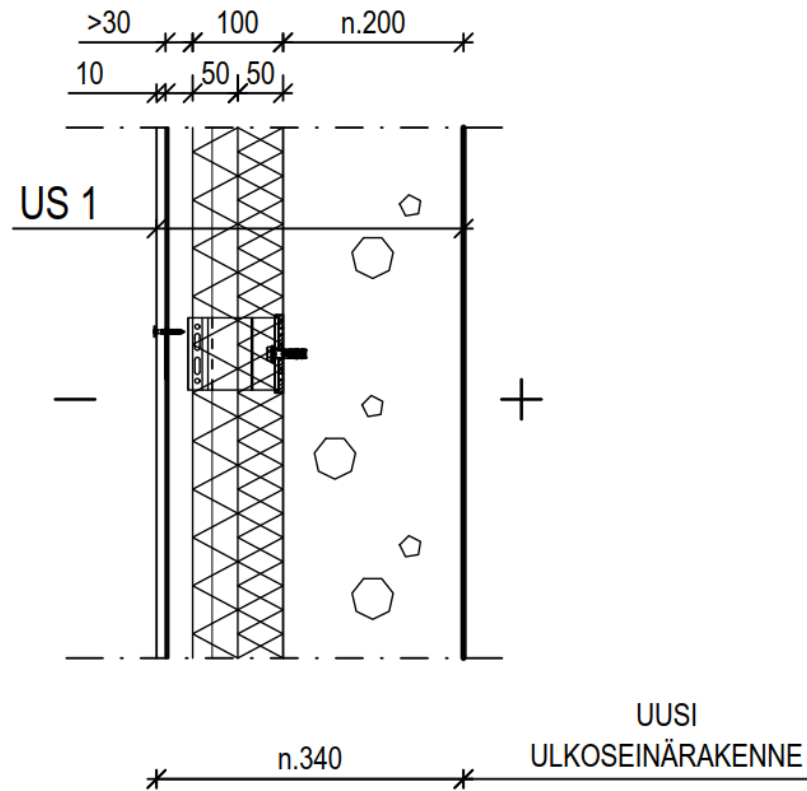
**Kuva 23.** Tiilimuurirunkoinen julkisivurakenne.

Uusi julkisivurakennevaihtoehto saadaan, kun vanhaan tiilimuurirunkoon lisätään 50 mm ruiskutettava polyuretaani- ja 70mm pehmeä mineraalivillakerros. Pehmeän mineraalivillakerroksen päälle asetetaan 50 mm tuulensuojapintainen mineraalivilla ennen yli 30 mm tuuletusväliä. Tuuletusvälin jälkeen lisätään 12 mm julkisivulevy ja pintaan 5-8 mm levyrapaus.

## 7.2 Kohde 2, betonirunko

Toinen case-kohde on rakennus, joka koostuu asuinkerrostalo-osiosta sekä liikuntahallista. Case-kohteen julkisivut ovat pesubetonisia kuorielementtejä asuinkerrostalon kohdalla. Osalla elementeistä on aaltomainen pinta. Vanhana lämmöneristeenä on ollut turvelevy. Ulkokuorielementtien taustabetoni on huonolaatuista ja betonissa on pitkälle edennyttä pakkasrapautumaa. Julkisivu uusitaan purkamalla vanhat ulkokuori- ja lämmöneristerakenteet, ja uusi julkisivurakenne tehdään tuulettavalla julkisivuverhouksella.

Uuteen julkisivurakenteeseen tulee alumiiniranka, ruiskutettava polyuretaani, eristelevyt ja julkisivulevyt. Julkisivurakenteen uusimisen yhteydessä betoninen sisäkuori esikäsittellään, jotta rakenteesta saadaan poistettua mahdolliset epäpuhtaudet, kuten mikrobit ja turvelevyjäämät. Sen jälkeen betonisäkuoren pinta tasoitetaan. Kuvassa 24 on esitetty betonirunkoisen julkisivurakenteen korjaustapa.



RAKENNE ULKOAPÄIN:

n.8...10mm	JULKISIVUVERHOUS ARK MUKAAN LEVYVERHOUS 8...10mm
>30mm	TUULETUSVÄLI + AL-PYSTYRANKA (HILTI EUROFOX JÄRJESTELMÄ)
100mm	LÄMMÖNERISTEET JA RUNKOKIINNIKKEET TUULENSUOJAPINTAINEN MINERAALIVILLA 50mm (ISOVER RKL-31 Facade) RUISKUTETTAVA POLYURETAANI 50mm (Ekospray 40E) RUNKOKIINNIKKEET (HILTI EUROFOX JÄRJESTELMÄ)
n.200mm	VANHA TERÄSBETONINEN SISÄKUORI ULKOPINNAN PUHDISTUS KORJAUSTYÖSELOSTUKSEN MUKAAN

UUDEN RAKENTEEN U-ARVO n. 0,26 W/m<sup>2</sup>K

**Kuva 24.** Betonirunkoinen julkisivurakenne.

Uusi julkisivurakennevaihtoehto saadaan, kun vanhaan teräsbetoniseen sisäkuoreen lisätään 50 mm paksu kerros ruiskutettavaa polyuretaania, 50 mm tuulensuojapintaista mineraalivillaa ennen yli 30 mm tuuletusväliä. Tuuletusvälin jälkeen julkisivurakenteen pintaan asetetaan julkisivuverhous 8-10 mm levyverhouksena.

## 8. ILMAÄNENERISTÄVYYDEN LASKEMINEN

Ilmaääneneristävyyttä laskettiin tiivillä ja epätiivillä sisäkuorilla case-kohteilla 1 ja 2. Ensin tarkastellaan ilmaääneneristävyyssarvoja yksinkertaisilla levyrakenteilla, jotka yhdistetään kaksinkertaiseksi rakenteeksi. Julkisivulevyn ja rappauksen oletetaan olevan liimakytkennällä toisissaan kiinni, ja julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmä lasketaan yhdeksi levyrakenteeksi. Ideaalituloksessa ilmaääneneristävyys kuvaa kaksinkertaiselle kytkemättömän rakenteen ilmaääneneristävyyttä, joka on jatkuva paloittain määritelty taajuuden funktio.

Korjaustermeillä saadaan ilmvälin absorptio ja rankareitin vaikutukset huomioitua lopullisen ilmaääneneristävyyden laskennassa. Epätiivillä rakenteilla sisäkuoren halkeamat heikentävät ääneneristävyyttä. Halkeamien vaikutus huomioidaan yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyyssarvoissa, minkä jälkeen laskentaprosessi on vastaavanlainen kuin tiiviillä rakenteilla. Rankareitin ja ilmvälin absorptio vaikutuksista ilmaääneneristävyydeksi määräytyy pienemmät ilmaääneneristävyyssarvot rankareitin ja ilmvälin absorptio ääneneristävyyssyhtälöistä.

### 8.1 Yksinkertainen levyrakenne

Ilmaääneneristävyyssuorituslaskentaa varten julkisivurakenteiden materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 3.

*Taulukko 3. Julkisivurakenteiden materiaaliominaisuudet [7].*

Materiaali	Pintamassa $m'$ ( $\text{kg/m}^2$ )	Kimmomoduuli $E$ (MPa)	Tiheys $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Poisson v kio $\nu$	Sisäinen häviökerroin $\eta_{\text{int}}$
tiili	260	7000	2000	0,2	0,01
betoni	480	27400	2400	0,2	0,01
julkisivulevy	6	1300	500	0,2	0,01
rappaus	13,2	7600	1650	0,2	0,01

Julkisivurakenteesta lasketaan jokaiselle levyrakenteelle erikseen taivutusjäykkyudet, jotka ovat riippuvaisia materiaalin kimmomoduulista, Poissonin vakiosta ja rakenteen paksuudesta. Julkisivurakenteen tarkasteltava pinta-ala on  $10 \text{ m}^2$  alue eli x-suuntaiseksi pituudeksi on valittu 4 m ja korkeudeksi 2,5 m. Julkisivulevyn ja rappauksen pintamassojen summauksella saadaan julkisivulevyn ja rappauksen yhteinen pintamassa. Julkisivulevy ja rappaus ovat liimakytkennällä toisissaan kiinni ja materiaaliominaisuuksien yhdistämisen jälkeen julkisivulevyä ja sen päällä olevaa rappausa tarkastellaan yksinkertaisena yhtenäisenä rakenteena.

Seinärakenteen ilmasteneristävyyden määrittämiseksi lasketaan ensin jokaisen levyrakenteen materiaaliparametrit erikseen. Ilmasteneristävyyttä varten määritetään levyrakenteen taivutusjäykkyudet. Taivutusjäykkyys B yksinkertaisille levyrakenteille eli tiilille ja betonille on

$$B = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{d^3}{12} \quad (2)$$

jossa E on materiaalin kimmomoduuli,  $\nu$  on Poissonin vakio ja d on rakenteen paksuus.

Julkisivulevy ja rappaus ovat toisissaan kiinni, jolloin taivutusjäykkyys julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmälle on

$$B = \sum_{i=1}^n (E_{eff,i} I_{0,i} + E_{eff,i} d_i (y_i - y_0)^2) = \sum_{i=1}^n (E_{eff,i} (I_{0,i} + d_i (y_i - y_0)^2)) \quad (3)$$

jossa

$E_{eff,i}$  on materiaalin efektiivinen kimmomoduuli

$I_{0,i}$  on neliömomentti

$d_i$  on materiaalin paksuus

$y_i$  on materiaalin vetojäykkyyskeskiö ja

$y_0$  on yhdistetyn materiaalin vetojäykkyyskeskiö.

Kahteen suuntaan taipuvalla levyrakenteella efektiivinen kimmomoduuli saadaan muotoon

$$E_{eff,i} = \frac{E_i}{1 - \nu^2} \quad (4)$$

ja materiaalin neliömomentti on

$$I_{0,i} = \frac{d^3}{12} \quad (5)$$

Materiaalin vetojäykkyyskeskiö on

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i d_i y_i)}{\sum_{i=1}^n (E_i d_i)} \quad (6)$$

jossa

$d$  on materiaalin paksuus

$y_1$  on julkisivulevyn vetojäykkyysskeskiö

$y_2$  rappauksen vetojäykkyysskeskiö

$y_0$  julkisivulevyn ja rappauksen vetojäykkyysskeskiö.

Yhdistämällä kaavat 3 ja 4 taivutusjäykkyys  $B$  julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmällä saadaan kaavan 44 muotoon

$$B = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} I_{0,1} + \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} d_1 (y_1 - y_0)^2 + \frac{E_2}{1 - \nu_2^2} I_{0,2} + \frac{E_2}{1 - \nu_2^2} d_2 (y_2 - y_0)^2 \quad (44)$$

$$B = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} (I_{0,1} + d_1 (y_1 - y_0)^2) + \frac{E_2}{1 - \nu_2^2} (I_{0,2} + d_2 (y_2 - y_0)^2)$$

ja yhdistetyn materiaalin vetojäykkyysskeskiöksi saadaan julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmällä

$$y_0 = \frac{E_1 d_1 y_1 + E_2 d_2 y_2}{E_1 d_1 + E_2 d_2} \quad (7)$$

jossa

$E_1$  on julkisivulevyn kimmomoduuli [Pa]

$d_1$  on julkisivulevyn paksuus [m]

$y_1$  on julkisivulevyn vetojäykkyysskeskiö [m]

$y_2$  rappauksen vetojäykkyysskeskiö [m]

$E_2$  on rappauksen kimmomoduuli [Pa]

$d_2$  on rappauksen paksuus [m]

$y_2$  on rappauksen vetojäykkyysskeskiö [m].

Sijoittamalla vetojäykkyysskeskiön  $y_0$  kaava 7 taivutusjäykkyyden  $B$  kaavaan 3 yhtälöksi saadaan kaava 45

$$B = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} \left( \frac{d_1^3}{12} + d_1 \left( y_1 - \frac{E_1 d_1 y_1 + E_2 d_2 y_2}{E_1 d_1 + E_2 d_2} \right)^2 \right) + \frac{E_2}{1 - \nu_2^2} \left( \frac{d_2^3}{12} + d_2 \left( y_2 - \frac{E_1 d_1 y_1 + E_2 d_2 y_2}{E_1 d_1 + E_2 d_2} \right)^2 \right) \quad (45)$$



Taivutusjäykkyydeksi saadaan julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmälle  $B_{\text{tiili}}=16,4$  MNm,  $B_{\text{betoni}}=19,0$  MNm ja  $B_{\text{levy+rappaus}}= 584$  Nm.

Rakenteen alin ominaistajuus on

$$f_{11} = \frac{c^2}{4f_c} \left( \frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} \right) \quad (8)$$

jossa

$f_c$  on koinsidenssin rajataajuus [Hz]

$l_x$  on rakenteen leveys [m] ja

$l_y$  on rakenteen korkeus. [m]

Rakenteiden alimmiksi ominaistajuuksiksi saatiin  $f_{11,\text{tiili}}=58$  Hz,  $f_{11,\text{betoni}}=70$  Hz  $f_{11,\text{levy+rappaus}}=1,9$  Hz.

Koinsidenssirajataajuus  $f_c$  on

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}} \quad (10)$$

jossa

$c$  on äänen nopeus [m/s]

$m'$  on rakenteen pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ].

Rakenteiden koinsidenssirajataajuuksiksi saatiin  $f_{c,\text{tiili}}=113$  Hz,  $f_{c,\text{betoni}}=94$  Hz  $f_{c,\text{levy+rappaus}}=3394$  Hz.

Leikkausaaltoalueen rajataajuus  $f_h$  on

$$f_h = \frac{1}{f_c} \left( \frac{c}{6h} \right)^2 \quad (11)$$

jossa

$h$  on rakenteen paksuus [m].

Rakenteiden leikkausaaltoalueen rajataajuuksiksi saatiin  $f_{h,\text{tiili}}=321$  Hz,  $f_{h,\text{betoni}}=869$  Hz  $f_{h,\text{levy+rappaus}}=2407$  Hz.

Alimman ominaistajuuden yläpuolella ilmaääneneristävyys noudattaa massalakia ja ilmaääneneristävydeksi  $R_0$  saadaan

$$R_0 = 20 \log m' + 20 \log f - 47 \quad (9)$$

Ilmääneneristävyydet eri rajataajuuksilla.

$$R = \begin{cases} R_0 + 20 \log \left(1 - \frac{f^2}{f_c^2}\right), & f < f_c \\ R_0 + 10 \log \eta + 10 \log \frac{f}{f_c} + 3, & f \geq f_c \\ R_0 + 10 \log \eta + 10 \log \frac{f}{f_c} - 10 \log \left( \frac{f}{5f_h} + \sqrt{\left(\frac{f}{5f_h}\right)^2 + 1} \right) + 3, & f > f_h \end{cases} \quad (12)$$

Leikkausaaltoalueen ilmääneneristävyyteen vaikuttaa rakenteen häviökerroin  $\eta$

$$\eta = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (13)$$

jossa  $\eta_{int}$  on rakenteen sisäinen häviökerroin, joka on tiilellä, betonilla ja levy- ja rappauskerroksella 0,01. Tällöin häviökertoimen arvoksi saadaan 0,18. Ilmääneneristävyydet lasketaan terssikaistojen taajuuksilla standardin ISO 717-1 mukaisesti 50-5000 Hz välisillä taajuuksilla, joiden avulla on saatu ilmääneneristävyydet taajuuden funktiona. Lopullinen ilmääneneristävyyden tulos saadaan vertailukäyrän avulla. Vertailukäyrän ääneneristävyyssarvot ovat standardin mukaiset, ja terssikaistoilla vertailukäyrän ja lasketun ilmääneneristävyysskäyrän väliin jäävän alue saa olla maksimissaan 32 dB. Vertailukäyrää siirretään y-akselin eli ilmääneneristävyyden suhteen, jotta käyrien väliin jääväksi alueeksi muodostuu alle 32 dB. Ilmääneneristävyyssarvo luetaan vertailukäyrältä 500 Hz taajuuden kohdalta. [38]

## 8.2 Kytkemätön kaksinkertainen levyrakenneseinä

Kaksinkertaisten rakenteiden puoliskot muodostavat ilmvälin kanssa massa-jousi-massajärjestelmän. Rakenteiden puoliskojen välissä oleva massa toimii jousena ja massalla on ominaistaajuus  $f_{mam}$

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{1}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (14)$$

jossa

$d$  on ilmvälin suuruus [m]

$m_1$  on rakenteen 1 pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

$m_2$  on rakenteen 2 pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ].

Ominaistaajuudeksi saatiin tiilen sekä julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmälle  $f_{mam,tiili}=36$  Hz ja betonin sekä julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmälle  $f_{mam,betoni}=49$  Hz. Ominaistaajuus on riippuvainen ilmavälin paksuudesta ja rakenteiden pintamassoista. Rajataajuuden  $f_d$  jälkeen ilmaväli ei toimi enää jousena ja äänen aallonpituus on pieni suhteessa ilmavälin suuruuteen. Ilmaväli  $d$  on kuudesosa äänen aallonpituudesta rajataajuudella  $f_d$ . Rajataajuus  $f_d$

$$f_d = \frac{c}{2\pi d} \quad (15)$$

Tiilen sekä julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmälle saatiin rajataajuudeksi  $f_{d,tiili}=364$  Hz ja betonin sekä julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmälle  $f_{d,betoni}=682$  Hz.

Ilmaääneneristävyys  $R$  on kaksinkertaisilla rakenteilla

$$R_{ideal} = \begin{cases} 20\log\left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}}\right), & f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20\log(fd) - 29, & f_{mam} < f < f_d \\ R_1 + R_2 + 6, & f > f_d \end{cases} \quad (16)$$

Yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyys  $R_1$  tiili- ja betonirunkoiselle rakenteille ovat  $R_1=62$  dB tiilirunkoisella kohteella 1 ja  $R_1=61$  dB betonirunkoisella kohteella 2 sekä julkisivulevyn ja rappauksen ilmaääneneristävyys  $R_2=33$  dB case-kohteilla 1 ja 2.

Ilmaääneneristävyysvertailukäyrä laskettu taajuuden funktiona standardin ISO 717-1 mukaisesti 5000 Hz taajuuteen asti terssikaistoittain. Vertailukäyrä sovitetaan ilmaääneneristävyyskäyrään niin, että käyrien residuaaliseksi summaksi muodostuu terssikaistojen tapauksessa 32 dB ja oktaavikaistojen tapauksessa 10 dB. Tässä laskennassa ilmaääneneristävyys määritettiin terssikaistojen avulla, jolloin vertailukäyrän arvojen ja sen alle jäävien mitattujen arvojen erotuksen tulisi olla alle 32 dB. Ilmaääneneristysluku  $R_w$  luetaan kuvaajasta 500 Hz taajuuden kohdalta vertailukäyrältä, kun vertailukäyrä on saatu sovitettua oikeaan paikkaan suhteessa ilmaääneneristävyyskäyrään. [38]

Case-kohteen 1 julkisivurakenne on tiilisisäkuori, ilmaväli ja julkisivulevyn ja rappauksen yhdistelmä. Case-kohteella 2 rakenne on samanlainen kuin case-kohteella 1 lukuun ottamatta tiilisisäkuorta, joka on kohteessa 2 betonia. Ilmaääneneristävyys kytkemättömälle kaksinkertaiselle julkisivurakenteelle case-kohteella 1 eli tiilisisäkuorella on 86 dB ja case-kohteella 2 eli betonisisäkuorirakenteella 80 dB. Tiili- ja betonisisäkuorien välillä ei ole juurikaan eroa ilmaääneneristävyysarvoissa. Kytkemättömällä rakenteella rankareittä eikä mineraalivillan absorptiokykyä ei ole näissä ilmaääneneristävyysarvoissa vielä huomioitu.

### 8.3 Ilmavälin absorptiomateriaalin huomioiminen

Jotta mineraalivillan absorptio saadaan huomioitua ilmaääneneristävyyssarvoissa, lasketaan ilmavälin absorptiomateriaalin korjausermi. Absorptiomateriaalista riippuvainen ilmaääneneristävyyden muutos  $\Delta R_{cav}$  saadaan laskettua kaavasta

$$\Delta R_{cav} = 10 \log \alpha_{eff} = 10 \log(\alpha_c FR) \quad (17)$$

jossa

$\alpha_{eff}$  on ilmavälin tehollinen absorptiosuhde

$\alpha_c$  on materiaalin absorptiosuhde ja

FR on ilmavälin täyttösuhde. [7, 39]

Materiaalin absorptiosuhde  $\alpha_c$  mineraalivillaisella ilmavälillä on tiilellä ja betonilla 0,8. Tyhjän ilmavälin tapauksessa  $\alpha_c$  on 0,1. FR tiilimuurirakenteella on mineraalivillan osuus koko ilmavälistä. Ilmavälin ja mineraalivillan paksuus yhteensä on 150 mm ja mineraalivillan paksuus 120 mm. Kohteen 1 tiilirakenteen ilmavälin täyttöasteeksi FR saadaan 120 mm / 150 mm = 0,8. Polyuretaanin osuus jätetään huomiotta sekä tiili- että betonirakenteella, koska ilmavälin rajapinnassa oleva polyuretaanikerros on tiivis. Kohteen 2 betonirakenteella ilmavälin täyttösuhdeksi muodostuu 50 mm / 80 mm = 0,625.

Absorptiomateriaalista riippuvaiseksi ilmaääneneristävyyden muutokseksi saatiin tiilirunkoisella rakenteella  $\Delta R_{cav,tiili} = -1,9$  dB ja betonirakenteella  $\Delta R_{cav,betoni} = -3,0$  dB.

Rajataajuus  $f_{cav}$  on riippuvainen äänen nopeudesta ilmassa ja ilmavälin leveydestä tai korkeudesta riippuen kumpi mitta on suurempi. Rajataajuus  $f_{cav}$  on

$$f_{cav} = \frac{c}{2 \max(L_x, L_y)} \quad (18)$$

jossa

$\max(L_x, L_y)$  on ilmavälin suurempi arvo leveydestä tai korkeudesta.

Rajataajuudeksi saatiin  $f_{cav} = 43$  dB. Ilmavälin absorptiomateriaali huomioidaan kavitteetin resonanssirajataajuuden  $f_{cav}$  yläpuolella, sillä absorptiomateriaalilla on vaikutusta ilmaääneneristävyyteen vain rajataajuutta  $f_{cav}$  suuremmilla arvoilla. Ilmavälin absorptiomateriaalin huomioimisen myötä ilmaääneneristävyyden paloittain määritelty jatkuva funktio muuttuu muotoon

$$R_{air} = \begin{cases} R_{ideal}, & f < f_{cav} \\ R_{ideal} + \Delta R_{cav}, & f > f_{cav} \end{cases} \quad (19)$$

Rajataajuus  $f_{cav}$  on riippuvainen äänen nopeudesta ilmassa ja ilmavälin leveydestä tai korkeudesta riippuen kumpi mitta on suurempi. [7, 39]

## 8.4 Seinärakenteen rankareitin huomioiminen

Joustavan rangan parannustermi  $\Delta R_{fb}=0$  dB, koska seinärakenne on jäykkä molemmilla case-kohteilla. Kokonaisääneneristävyys rankareitille saadaan massalain  $R_{sum}$  ja rankareitin korjaustermin  $\Delta R_m$  summasta, kun rankareitin ilmaääneneristävyys  $R_{ranka}$  saadaan yhtälöstä

$$R_{ranka} = R_{sum} + \Delta R_m \quad (20)$$

Kaksinkertaisen rakenteen ääneneristävyys massalain mukaan on  $R_{sum}$  ja rankareitistä aiheutuva kaksinkertaisen rakenteen ääneneristävyuden muutos  $\Delta R_m$  saadaan seuraavista yhtälöistä

$$R_{sum} = 20 \log \left( 10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) \quad (21)$$

$$\Delta R_m = 10 \log \left( b \left( \frac{m'_1 \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 m'_2} \right)^2 \right) - 23 \quad (22)$$

jossa

$b$  on viivakytkentöjen eli rankojen välinen etäisyys [m]. [7, 39]

Joustavat rangat parantavat ilmaääneneristävyttä, mikä huomioidaan joustavan rangan muutostermillä  $\Delta R_{fb}$ . Jäykillä rakenteilla  $\Delta R_{fb}$  on nolla, joten joustavan rangan muutostermiä ei tässä näillä case-kohteilla tarvitse laskea. Rakenteen ääneneristävyuden muutokseksi saatiin tiilirakenteella  $\Delta R_{m,tiili}=4,4$  dB ja betonirakenteella  $\Delta R_{m,betoni}=2,6$  dB. Lopullinen ilmaääneneristävyys kytketyillä kaksinkertaisilla rakenteilla on minimiarvo  $R_{ranka}$  ja  $R_{air}$  arvoista eli  $R=\min(R_{ranka}, R_{air})$ . [7, 39]

## 8.5 Sisäkuoren halkeamien huomioiminen

Epätiivillä sisäkuorella on heikentävä vaikutus ilmaääneneristävyyteen. Sisäkuoressa olevia halkeamia ja niiden vaikutusta lasketaan viivamaisen raon ilmaääneneristävyuden laskentateorian avulla. Rakojen ilmaääneneristävyuden laskentateoria viivamaisen raon tapauksessa voidaan laskea Gomperts ja Kihlmannin teorian avulla.

Päätekorjauskerroin  $e$  on dimensioton suure

$$e = \frac{\alpha}{\beta} \quad (24)$$

jossa

$\alpha$  raon päätekorjaus ja

$\beta=0,001$  m raon leveys.

Päätekorjauskerrointa  $e$  approksimoidaan viivamaiselle raolle kaavasta

$$e = \frac{2}{\pi} \left( \ln \frac{8}{K} - \gamma' \right) \quad (25)$$

jossa

$\gamma' = 0,577$  Eulerin vakio ja

$K$  on dimensioton suure

$$K = \frac{2\pi f\beta}{c_0} \quad (26)$$

Kaava pätee, kun  $K \leq 0,5$ . Raon ilmääneneristävyys lasketaan kaavalla

$$R_{rako} = 10 \log \frac{2n^2 \left( \frac{\sin^2(K(L+2e))}{\cos^2(Ke)} + \frac{K^2}{2n^2} (1 + \cos(K(L+2e))\cos(KL)) \right)}{mK\cos^2(Ke)} \quad (27)$$

jossa

$m$  on 8 diffuusille äänikentälle

$n$  on 1, jos rako on rakenteen keskellä äänilähteen puolella tai 0,5, jos rako on seinärakenteen nurkassa ja

$L$  on dimensioton suure

$$L = \frac{l}{\beta} \quad (28)$$

jossa

$l$  on raon syvyys eli sisäkuoren paksuus.

Viivamaiselle keskellä seinää olevalle halkeamalle laskettiin ilmääneneristävyys  $R_{rako}$  tiilelle ja betonille. [6]

## 8.6 Kytetyn kaksinkertaisen levyrakenneseinän ilmääneneristävyys

Lasketaan julkisivurakenteiden ilmääneneristävyydet tiiviillä ja epätiiviillä rakenteilla, ja epätiiviiin rakenteen tapauksessa sisäkuoressa on koko sisäkuoren leveydeltä halkeama. Pinta-alojen ja eri osien ilmääneneristävyydsarvojen perusteella lasketaan energieettinen yhteisääneneristävyys, joka kuvaa koko rakenteen ilmääneneristävyyden keskiarvoa. Sisäkuoren ja raon yhteisvaikutus  $R_{\text{sisäkuori+rako}}$  saadaan yhtälöstä

$$\begin{aligned}
R_{\text{sisäkuori+rako}} &= -10 \log \left( \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n S_i 10^{-0,1R_i} \right) \\
&= -10 \log \frac{(S_{\text{tot}} - S_{\text{rako}}) 10^{-\frac{R_1}{10}} + S_{\text{rako}} 10^{-\frac{R_{\text{rako}}}{10}}}{S_{\text{tot}}} \\
&= -10 \log \frac{(l_x - d_{\text{rako}}) 10^{-\frac{R_1}{10}} + d_{\text{rako}} 10^{-\frac{R_{\text{rako}}}{10}}}{l_x}
\end{aligned} \tag{29}$$

jossa

$S_i$  on rakenteen pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$S_{\text{tot}}$  on koko sisäkuoren pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$S_{\text{rako}}$  on raon pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$R_1$  on sisäkuoren ilmasteneristävyys [dB] ja

$R_{\text{rako}}$  on raon ilmasteneristävyys [dB].

Äärettömän korkeaksi oletettu raon korkeus supistuu yhtälöstä pois, kun se otetaan jokaisesta termistä yhteiseksi tekijäksi ja raon korkeus oletetaan yhtä korkeaksi kuin tarkasteltavan sisäkuoren korkeus. Kun sisäkuoren ja raon yhteisvaikutus on laskettu, yhdistetään ilmasteneristävyiden arvot samalla tavalla kuin tiiviin sisäkuoren tapauksessa. Kytkeytyn kaksinkertaisen levyrakenneseinän ilmasteneristävyys saadaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta. Tiilirakenteella ilmasteneristävyudeksi saadaan  $R_{\text{tiili}}=67$  dB ja betonirakenteella  $R_{\text{betoni}}=64$  dB. Kun otetaan huomioon spektripainotusermit ilmasteneristävyudeksi saadaan sekä tiiviillä että epätiiviillä rakenteella  $R_{w,\text{tiili}}+C_{\text{tr}}=59$  dB ja  $R_{w,\text{betoni}}+C_{\text{tr}}=58$  dB. [7]

## 9. KOSTEUDEN JA LÄMMÖN SIIRTYMISEN MALLINTAMINEN

Kosteuden ja lämmön siirtymistä julkisivurakenteissa mallinnettiin Wufi 2D-ohjelmalla. Sen lisäksi laskettiin kosteusvirtaa rakenteessa tiiviillä ja epätiiviillä rakenteilla. Wufilaskuissa ei huomioitu ilman siirtymistä tiili- tai betonirakenteen läpi, vaan julkisivurakenteiden kosteuden ja lämmön siirtymistä mallinnettiin diffuusiolla olettamalla rakenteet ilmatiiviiksi. Lisäksi on tehty laskelmat ottamalla huomioon huokoinen tiili tai halkeamat betonimateriaaleissa, jolloin kosteusmäärää epätiiviillä sisäkuorella laskettiin valitulla halkeamasyteemillä ja paine-erolla. Diffuusiolla siirtyvän kosteuden lisäksi on huomioitu kosteuden siirtyminen konvektiolla, jolloin tulokset saadaan lähemmäksi todellisten seinärakenteiden lämmön ja kosteuden siirtymistä, ja mahdolliset halkeamat sisäkuoreissa tulee huomioitua. Tiilimuuri- ja betonirunkoisia case-kohteita on tarkasteltu myös vaihtoehtoisilla rakenneratkaisuilla, joissa polyuretaani korvataan paksummalla mineraalivillakerroksella. Laskentatarkastelut tehtiin Jokioisten ja Vantaan nykyilmas-  
toilla.

### 9.1 Kosteusvirta diffuusiolla

Wufilla mallinnettaessa huomioidaan diffuusion vaikutus kosteusvirtaan, jolloin mallin-  
nustulos vastaa tiiviiden julkisivurakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä. Jokaista julkisivurakennetarkastelua varten täytyy määrittää laskentaparametrit ja reuna-  
ehdot, jotka vaikuttavat laskentatuloksiin. Julkisivurakennemateriaaleja tarkasteltaessa  
määritetään muun muassa materiaalien lämmönjohtavuudet ja vesihöyrynläpäisevyys,  
joiden avulla lämmön ja kosteuden siirtymistä pystytään mallintamaan. Sen lisäksi tar-  
kastellaan ulko- ja sisätilan olosuhteita ja vallitsevan lämpötilan mukaan valitaan raken-  
teeseen kohdistuvat kosteuslisät. Kosteuden ja lämmön siirtymistä mallinnettiin tiiviillä  
rakenteilla ja sen lisäksi pyrittiin määrittämään luotettavasti epätiivisiin sisäkuoren vaiku-  
tus lämmön ja kosteuden siirtymisen tarkasteluissa.

Aluksi wufilla tehtiin kosteuden ja lämmön siirtymisen mallinnukset olettaen, että sisä-  
kuori on tiivis. Mallinnuksen avulla saadaan teoreettiset tulokset kosteuden ja lämmön  
siirtymiselle. Todellisuudessa kuitenkin rakenteessa olevat ilmaraot aiheuttavat kosteu-  
den ja lämmön siirtymistä tehokkaammin rakenteeseen, eikä tiiviillä rakenteilla mallinta-  
minen anna täysin käytäntöön vastaavia tuloksia. Wufilla lasketut tulokset huomioivat  
diffuusion kautta siirtyvän kosteuden, mutta konvektion kautta kulkeutuvaa kosteuden ja  
lämmön siirtymistä mallinnuksessa ei ole huomioitu.



Tiiviillä rakenteilla laskettaessa kaikkien kohteiden seinärakenteita yksinkertaistettiin mallintamalla rakenteet ilman tuuletusväliä. Molemmilla case-kohteilla tiiviin polyuretaanin vuoksi kosteutta ei kerry rakenteeseen, ja rakenteiden homeindeksit eivät ole nolasta poikkeavia. Toinen rakenneratkaisuvaihtoehto polyuretaanin tilalle on paksumpi mineraalivillakerros. Tarkasteltiin molempia case-kohteita paksummalla mineraalivillakerroksella, ja kohteen 1 mineraalivillakerroksen paksuus oli 180mm ja kohteen 2 130 mm. Mineraalivillapaksuudet valittiin riittävän paksuiksi, jotta julkisivurakenteen U-arvo ei heikkene.

### 9.1.1 Materiaaliominaisuudet

Lämmön- ja kosteudensiirtymisen mallinnusta varten tarkasteltiin jokaisen case-kohteen julkisivurakennetta ja rakenteiden materiaaliominaisuuksia. Tiilimuurirakenteessa lämmön ja kosteuden siirtymisen mallintamista varten tarkasteltiin seinärakenteen materiaaliominaisuuksia, jotka on esitetty taulukossa 4. Materiaaliominaisuudet on valittu wufin materiaalikirjastosta, josta on valittu sopivat materiaalit julkisivurakenteisiin.

*Taulukko 4. Tiilimuurirakenteen materiaaliominaisuudet.*

<b>Materiaali</b>	<b>Kerros- paksuus (mm)</b>	<b>Lämmönjohta- vuus (W/mK)</b>	<b>Vesihöyrynlä- päisevyys <math>\delta_p</math> (kg/(msPa))</b>	<b>Vesihöyryn- läpäisevyys <math>\delta_v</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Tiilimuri</b>	300	0,6	10,0	$3 \cdot 10^{-6}$
<b>Ruiskutettava polyuretaani (Ekospray 40E)</b>	50	0,03	50,0	
<b>Pehmeä mine- raalivilla (Iso- ver kl-C 50)</b>	70	0,035	1,2	$2 \cdot 10^{-5}$
<b>Tuulensuoja- pintainen mi- neraalivilla (Isover rkl- 31)</b>	50	0,031	1,4	
<b>Julkisivulevy</b>	12	0,2	8,33	

Tiilimuurirakenteisen julkisivun U-arvo on 0,17 W/m<sup>2</sup>K.

Betonirakenteessa lämmön ja kosteuden siirtymisen mallintamista materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5.** *Betonirakenteen materiaaliominaisuudet.*

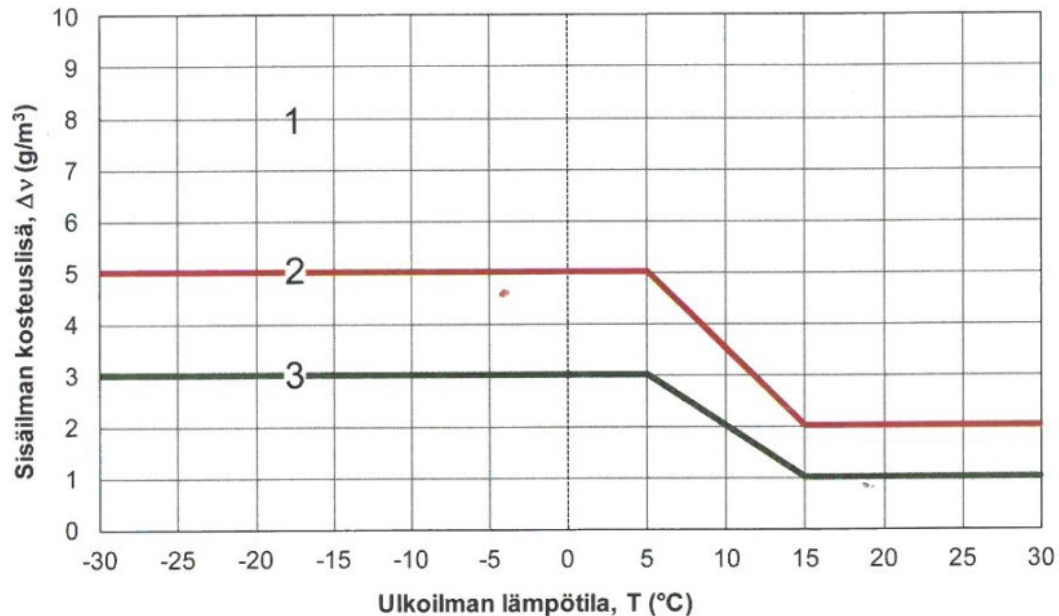
<b>Materiaali</b>	<b>Kerrospaksuus (mm)</b>	<b>Lämmönjohtavuus (W/mK)</b>	<b>Vesihöyrynläpäisevyys <math>\delta_p</math> (kg/(m<sup>2</sup>Pa))</b>	<b>Vesihöyrynläpäisevyys <math>\delta_v</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Betoni</b>	200	1,6	180	$2 \cdot 10^{-7}$
<b>Ruiskutettava polyuretaani (Ekospray 40E)</b>	50	0,03	50,0	
<b>Pehmeä mineraalivilla (Isover kl-C 50)</b>	50	0,035	1,2	$2 \cdot 10^{-5}$
<b>Tuulensuojapintainen mineraalivilla (Isover rkl-31)</b>	50	0,031	1,4	
<b>Julkisivulevy</b>	10	0,2	8,33	

Betonirakenteisen julkisivun U-arvo on 0,26 W/m<sup>2</sup>K. Vanhan betonirakenteen U-arvo oli 0,56 W/m<sup>2</sup>K eli uudella julkisivurakenteella saadaan U-arvoa parannettua merkittävästi.

Julkisivurakenteissa lämmöneristysrakenteiden konvektio eroaa laskentamalleissa käytännön tilanteesta, sillä ideaalitalanteessa materiaalikerrokset liittyvät toisiinsa saumattomasti. Todellisuudessa materiaalikerrosten rajapinnoilla on kuitenkin lämmön tai aineen siirtymistä hidastavia epäjatkuvuuskohtia. Todellisuudessa materiaalipintojen välinen kontakti ei ole täysin tiivis, vaan pintojen väliset raot aiheuttavat lisäkonvektiota. [51]

### 9.1.2 Sisäilman kosteuslisä

Rakennuksen sisätilan kosteuden vaikutusta otetaan huomioon sisäilman kosteuslisän avulla. Sisätilasta aiheutuva kosteus vaikuttaa merkittävästi julkisivurakenteiden toimivuuteen, ja kosteuden tuotto huomioidaan kosteuslisän avulla kolmen eri kosteusluokan mukaisesti. Sisäilman kosteuslisä ulkoilman lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 25.



**Kuva 25.** Sisäilman kosteuslisä ulkotilan lämpötilan funktiona rakennuksen eri kosteusluokilla [25].

Talvella sisätilasta tuleva kosteus on suurempi kuin kesällä, koska talvella ihmiset ovat enemmän rakennuksen sisätiloissa ja kesällä puolestaan sisätiloja tuuletetaan ikkunoiden kautta enemmän. Rakennuksen ulkolämpötila vaikuttaa kosteusmäärään. Kosteusluokkaan 1 kuuluvat esimerkiksi kylpylät ja uimahallit, kosteusluokkaan 2 asuinrakennukset ja kosteusluokkaan 3 puolilämpimät rakennukset ja varastot. Kosteusluokalla 2 kosteuslisän määrä on  $-5\text{ °C}$  asti  $5\text{ g/m}^3$ , josta kosteuslisän määrä laskee lineaarisesti ja  $+15\text{ °C}$  suuremmilla lämpötiloilla kosteuslisän määrä on  $2\text{ g/m}^3$ . Sisäilman lämpötilana käytetään wufi:lla mallinnettaessa  $+21\text{ °C}$  lämpötilaa, kun sisätilassa on normaali huoneen lämpötila ympäri vuoden. [25]

Sisäilman kosteuslisä vaikuttaa diffuusiolla siirtyvän kosteuden kulkeutumiseen rakenteissa. Sisäilman kosteuslisän avulla lasketaan sisäilman vesihöyrynpitoisuus, kun tiedetään ulkoilman vesihöyrynpitoisuus. Ulkoilman vesihöyrynpitoisuus lasketaan wufilla saatujen suhteellisen kosteusarvojen ja lämpötilan avulla, kun suhteellinen kosteus kertoo prosentteina vesihöyrynpitoisuuden ja kyllästyskosteuspitoisuuden suhteen. Vesihöyrynpaine  $p_{\text{sat}}$  lämpötilan funktiona saadaan yhtälöstä

$$p_{sat} = \begin{cases} 610,5e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}}, & \theta \geq 0^\circ\text{C} \\ 610,5e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}}, & \theta < 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (38)$$

Vesihöyryn kyllästyspitoisuus  $v_{sat}$  lasketaan ideaalikaasun tilanyhtälön avulla

$$v_{sat} = \frac{p_{sat}}{R_v T} \quad (39)$$

jossa

$R_v$  on kaasuvakio 462 J/(kgK) ja

$T$  on lämpötila [K].

Vesihöyryn kyllästyspitoisuuden ja wufista saatujen suhteellisten kosteuden ja lämpötila-arvojen avulla saadaan ulkoilman vesihöyrypitoisuus  $v_{ulko}$ . Ulkoilman vesihöyrypitoisuuden ja sisäilman kosteuslisän  $\Delta v$  avulla saadaan sisäilman vesihöyrypitoisuus  $v_{sisä}$  lasketua.

Diffuusiolla siirtyvä kosteus  $g_{diff}$  julkisivurakenteelle saadaan muokkaamalla kaavasta 37

$$\begin{aligned} g_{diff} &= \frac{v_{ulko} - v_{sisä}}{Z_{v,tiili} + Z_{v,villa} + Z_{v,levy+rappaus}} \\ &= \frac{v_{ulko} - v_{sisä}}{\frac{L_{sisäkuori}}{\delta_{v,sisäkuori}} + \frac{L_{villa}}{\delta_{v,villa}} + \frac{L_{levy+rappaus}}{\delta_{v,levy+rappaus}}} \end{aligned} \quad (37)$$

jossa

$Z_v$  on vesihöyrynvastus

$L$  on materiaalin paksuus ja

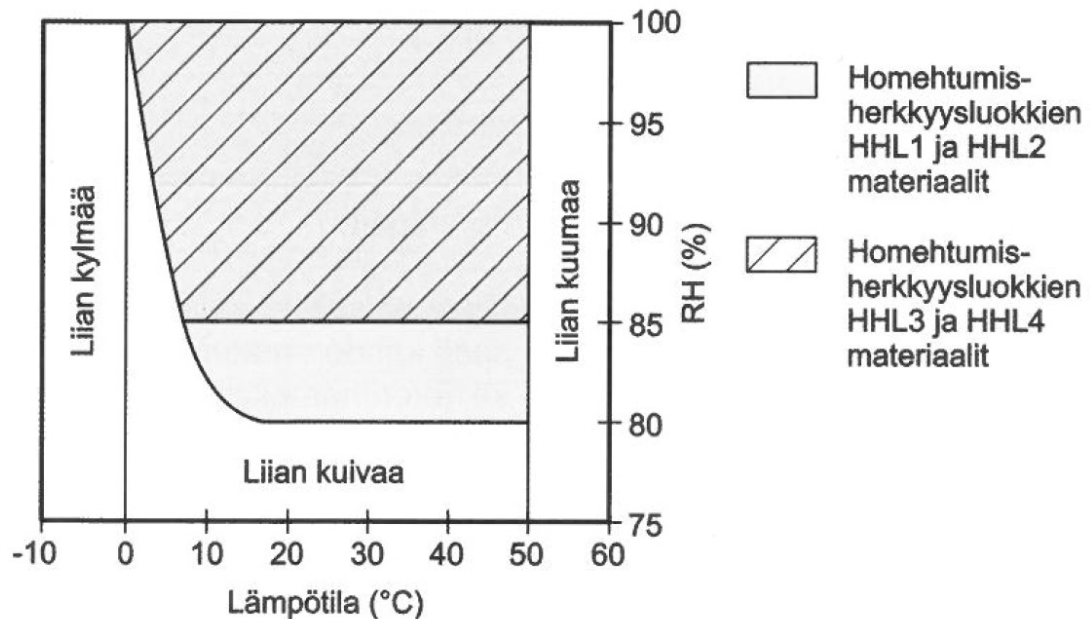
$\delta_v$  on vesihöyrynläpäisevyys.

Diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta on yksi tekijä mitä tarkastellaan varmistaessa rakenteen rakennusfysikaalista toimivuutta. [25, 49]

### 9.1.3 Homehtumisherkkyyys

Julkisivurakenteen homehtumisherkkyyttä tarkastellaan homehtumisindeksin avulla. Materiaalit jaetaan eri homehtumisherkkyytsluokkiin, ja eri materiaaleilla on eri lämpötilat ja suhteellisen kosteuden arvot, missä homehtumisriski kasvaa. Hyvin herkkään homehtumisherkkyytsluokkaan 1 kuuluvat karkeasahattu ja mitallistettu puutavara sekä höylätty mänty, herkkään homehtumisherkkyytsluokkaan 2 höylätty kuusi, paperipohjaiset materiaalit ja kalvot, puupohjaiset levyt ja kipsilevyt, kohtalaisen herkkään homehtumisherkkyytsluokkaan 3 mineraalivillat, muovimateriaalit, kevyt- ja kevytsorabetoni, sementtipohjaiset tuotteet ja tiilet ja kestävään homehtumisherkkyytsluokkaan 4 lasit, metallit, alkalinen uusi betoni ja tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit. [5]

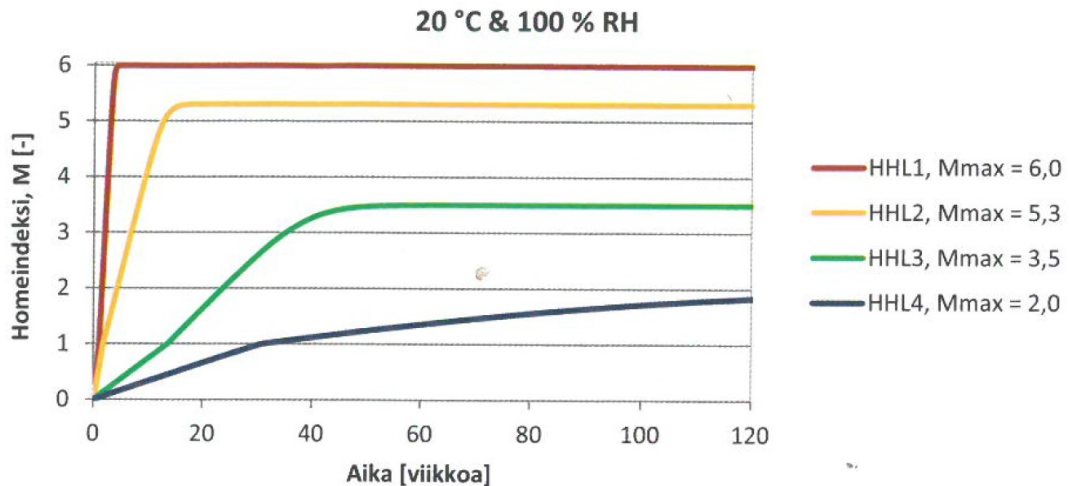
Homehtumisherkkyyssuokat ja niiden esiintyminen eri suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoilla on esitetty kuvassa 26.



**Kuva 26.** Homehtumiselle suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet eri homehtumisherkkyyssuokilla [5].

Liian kylmällä eli pakkasella ja liian kuumalla eli yli  $50^{\circ}\text{C}$  lämpötiloilla homehtumisriskiä ei ole. Jos suhteellinen kosteus on alle  $80\% \text{ RH}$ , on olosuhteet liian kuivat homehtumiselle. Tätä suuremmilla suhteellisen kosteuden arvoilla homehtuminen on mahdollista. Materiaalit jaetaan homehtumisherkkyyssuokkiin 1-4, joista homehtumisherkkyyssuokkien 1-2 materiaalien homehtumisriski esiintyy homehtumisherkkyyssuokkien 3-4 materiaaleja alhaisemmilla suhteellisen kosteuden arvoilla. [5]

Kuvassa 27 on esitetty homeindeksit eri homehtumisherkkyyssuokilla.



**Kuva 27.** Maksimihomeindeksit eri homeutumisherkkyyssluokilla lämpötilan ollessa 20°C 100 % suhteellisella kosteudella [5].

Homeutumisherkkyyssluokilla on eri homeindeksit, ja homeindeksien maksimiarvot jäävät eri tasoille eri luokissa riippumatta homeutumisen altistusajasta. Herkemmin homehtuvat materiaalit saavuttavat maksimihomehtumisarvon paljon nopeammin kuin kestävämmät materiaalit. Homeutumisherkkyyssluokassa 1 homeindeksin maksimiarvo on 6, mikä saavutetaan jo muutamien viikkojen jälkeen. Homeutumisherkkyyssluokalla 2 homeindeksin maksimiarvo on 5,3, minkä saavuttamiseen menee toistakymmentä viikkoa. Homeutumisherkkyyssluokilla 3 ja 4 homeindeksin maksimiarvot ovat 3,5 ja 2,0, ja ne saavutetaan yli 30 viikon altistumisajan jälkeen. Homeindeksin kasvunopeuteen ja homeindeksin maksimiarvoon eri homeutumisherkkyyssluokissa vaikuttavat sekä lämpötila että suhteellinen kosteus. Kun lämpötila putoaa nollan alapuolelle tai kun suhteellisen kosteuden määrä putoaa 80-85 % RH alapuolelle, homeen kasvu pysähtyy ja homeen kasvun taantuminen alkaa. [5]

## 9.2 Kosteusvirta konvektiolla

Epätiivillä sisäkuorilla ilmaa virtaa halkeamien ja ilmavuotokohtien kautta rakenteen läpi aiheuttaen kosteuden siirtymistä rakenteeseen. Kosteusvirta kulkeutuu konvektion avulla, ja kokonaiskosteusvirta määräytyy konvektion ja diffuusion yhteisvaikutuksesta. Suurilla vesihöyrypitoisuuksilla rakenteessa tapahtuu kondensoitumista ja suotuisat olosuhteet mahdollistavat homeen ja mikrobin kasvun rakenteessa.

### 9.2.1 Ilmavirran laskeminen halkeamissa

Ilmavirran määrän laskemisessa tarkasteltiin sisäkuoressa olevia halkeamia, joiden läpi virtaavan ilman määrän avulla määritettiin kosteuden kertyminen julkisivurakenteisiin. Laskennassa ilman virtaus paksun rakenteen läpi laskettiin eri paine-eroilla ja eri halkea-

maleveysillä. Mitä enemmän ilmaa virtaa rakenteen läpi, sitä enemmän ilmavirta kuljettaa myös vesihöyryä rakenteeseen. Ilmavirran laskennan tavoitteena on määrittää kosteuden kertymisen määrää rakenteessa ja tarkastella, ylittyykö RH 100 % suhteellisen kosteuden arvo eli kondensoituuko rakenteisiin jollekin pinnalle vettä.

Tarkastellaan esimerkkitilannetta, jossa sisäilman kosteus siirtyy rakenteisiin. Kun riittävästi kosteutta on siirtynyt ilmavirran mukana, voi rakenteisiin muodostua kondenssia, jos suhteellinen kosteus ylittää yli 100 % RH. Sisälämpötilalla +20 °C maksimi vesihöyrypitoisuudeksi saadaan  $v = 17,3 \text{ g/m}^3$  [55]. Tarkastellaan kahden case-kohteen julkisivurakenteiden läpi virtaavan ilman määrä  $Q$ , joiden avulla lasketaan kosteusvirta  $q$  lämpötilalla +20 °C. Laskennassa on arvioitu sisä- ja ulkotilan paine-eroksi 5 Pa. Sen lisäksi halkeamanleveydeksi määritettiin 1 mm ja halkeaman korkeudeksi 0,5 m. Halkeaman pituus on kohteen sisäkuorirakenteen paksuus. Halkeamaleveys ja paine-erot ovat samat kaikille kahdella case-kohteella vertailukelpoisuuden vuoksi. Talvella kosteutta kertyy rakenteisiin enemmän kuin kesällä, joten tarkastelukohteena on talviaika, ja suhteelliseksi kosteudeksi on valittu keskimääräinen 50 % RH. Talviaikana vesihöyrypitoisuus on käytännössä sisätilan vesihöyrypitoisuus, koska ulkotilan vesihöyrypitoisuus on laskennan kannalta mitättömän pieni.

### Kohde 1, tiilimuurirunko

$b := 1 \text{ mm}$	halkeamaleveys
$d := 0.5 \text{ m}$	halkeaman korkeus
$A := b \cdot d = (5 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$	halkeaman pinta-ala
$\eta := 17.4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	ilman viskositeetti
$\Delta p := 5 \text{ Pa}$	paine-ero
$L_{\text{tiili}} := 300 \text{ mm}$	halkeaman pituus eli rakenteen paksuus
$Q := A \cdot \frac{b^2}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta p}{L_{\text{tiili}}} = (3.991 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	ilmavirta halkeaman läpi
$v_1 := 0.5 \cdot 0.00139 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	-15C ulkoilman vesihöyrypitoisuus 50% RH:lla
$v_2 := 0.5 \cdot 0.0173 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	huoneilman vesihöyrypitoisuus 50 % RH:lla
$\Delta v := v_2 - v_1 = 0.008 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	vesihöyrypitoisuusero

<b>Kohde 2, betonirunko</b>	
$b := 1 \text{ mm}$	halkeamaleveys
$d := 0.5 \text{ m}$	halkeaman korkeus
$A := b \cdot d = (5 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$	halkeaman pinta-ala
$\eta := 17.4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	ilman viskositeetti
$\Delta p := 5 \text{ Pa}$	paine-ero
$L_{\text{betoni}} := 200 \text{ mm}$	halkeaman pituus eli rakenteen paksuus
$Q := A \cdot \frac{b^2}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta p}{L_{\text{betoni}}} = (5.987 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	ilmavirta halkeaman läpi
$v_1 := 0.5 \cdot 0.00139 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	-15C ulkoilman vesihöyrynpitoisuus 50% RH:lla
$v_2 := 0.5 \cdot 0.0173 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	huoneilman vesihöyrynpitoisuus 50 % RH:lla
$\Delta v := v_2 - v_1 = 0.008 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	vesihöyrynpitoisuusero

Ilmavirran ja kosteusvirran määrät eri case-kohteilla on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Ilma- ja kosteusvirran määrät case-kohteissa.

Kohteet	Ilmavirta Q (m <sup>3</sup> /s)	Kosteusvirta q (kg/s)
<b>Kohde 1</b>	4,0*10 <sup>-5</sup>	3,2*10 <sup>-7</sup>
<b>Kohde 2</b>	6,0*10 <sup>-5</sup>	4,8*10 <sup>-7</sup>

Kohteella 1 tiilimuurirakenteen sisäkuoren halkeamien kautta virtaavan ilmavirran määrä on  $Q_1 = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  ja kohteella 2 betonirunkoisella  $Q_2 = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Kohteella 1 ilmavirran avulla lasketaan kosteusvirta rakenteessa, ja kosteusvirraksi saadaan  $q_1 = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s}$  ja kohteella 2  $q_2 = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s}$ .

Halkeamakorkeuden pysyessä vakiona tarkastellaan halkeamaleveyden ja paine-eron muuttumisen vaikutusta ilmavirran ja kosteusvirran määriin. Taulukossa 7 tarkastellaan paine-eron vaikutusta ilmavirran ja kosteusvirran suuruuteen.



**Taulukko 7.** Paine-eron vaikutus ilma- ja kosteusvirtaan case-kohteissa.

Kohteet	$\Delta p$ 5 Pa	$\Delta p$ 5 Pa	$\Delta p$ 10 Pa	$\Delta p$ 10 Pa
1 mm halkeama, $\Delta p$ 5 Pa-10 Pa	Ilmavirta Q (m <sup>3</sup> /s)	Kosteusvirta q (kg/s)	Ilmavirta Q (m <sup>3</sup> /s)	Kosteusvirta q (kg/s)
Kohde 1	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$
Kohde 2	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$

Paine-ero vaikuttaa ilmavirran määrään lineaarisesti eli paine-eron kaksinkertaistussa ilmavirran määrä kaksinkertaistuu. Ilmavirta on vaikuttaa myös lineaarisesti kosteusvirtaan eli paine-eron kaksinkertaistussa kosteusvirran määrä kaksinkertaistuu.

Halkeamaleveyden muuttumista ilma- ja kosteusvirran määrään on tarkasteltu taulukossa 8.

**Taulukko 8.** Paine-eron vaikutus ilma- ja kosteusvirtaan case-kohteissa.

Kohteet	1 mm	1 mm	2 mm	2 mm
1-2 mm halkeama, $\Delta p$ 5 Pa	Ilmavirta (m <sup>3</sup> /s)	Kosteusvirta (kg/s)	Ilmavirta (m <sup>3</sup> /s)	Kosteusvirta (kg/s)
Kohde 1	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$
Kohde 2	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$

Halkeaman leveydellä on suurempi vaikutus ilmavirran suuruuteen verrattuna paine-eron muutokseen. Halkeamaleveyden vaikutus ei ole lineaarinen vaan halkeaman kasvaessa 1 mm:stä 2 mm:iin ilmavirran määrä nelinkertaistuu. Tällöin myös kosteusvirran määrä nelinkertaistuu, koska ilmavirran ja kosteusvirran määrät käyttäytyvät lineaarisesti. Verrattuna paine-eron muutokseen, halkeamaleveydellä on suurempi merkitys ilmavirran määrään ja sitä kautta myös kosteusvirran määrään. Halkeamaleveyden suuremman vaikutuksen voi huomata myös kaavasta 5, koska halkeamaleveys on toiseen potenssiin.

## 9.2.2 Ilmavirran mukana siirtyvä kosteus

Epätiivien rakenteiden tapauksessa käytettiin samoja kahta julkisivurakennetta kuin tiiviillä rakenteilla, mutta paksumpia mineraalivillakerroksia ilman polyuretaania. Sisäkuoren epätiivius aiheuttaa suuremman kosteuden ja lämmön siirtymisen rakenteeseen. Wufilla laskettaessa kosteuden ja lämmön siirtymistä mallinnettiin ainoastaan diffuusion kautta kulkeutuvan vesihöyrymäärällä. Laskennallinen tarkastelu tehtiin myös konvektion määrälle, minkä avulla saadaan tarkasteltua epätiivien sisäkuoren ilmavuotojen vaikutus kosteuden ja lämmön siirtymiselle.

Vaikka sisäkuori on epätiivis, molemmilla case-kohteilla tiiviin polyuretaanin vuoksi kosteutta ei kerry rakenteeseen, ja rakenteiden homeindeksit eivät ole nollassa poikkeavia. Case-kohteiden julkisivurakenteita muutettiin lisäksi jättämällä tiivis polyuretaanikerros kokonaan pois ja lisäämällä mineraalivillakerroksen paksuutta niin, että julkisivurakenteen U-arvo pysyy kuitenkin samana. Tällöin saadaan tarkasteltua, muodostuuko ilman polyuretaania olevasta rakenneratkaisusta riittävä kosteuden ja lämmön siirtymisen kannalta. Kohteella 1 tiilimuurirunkoisella rakenteella polyuretaani poistetaan ja tiilen pintaan lisätään 180 mm paksu mineraalivillakerros. Kohteella 2 betonirunkoisella rakenteella polyuretaani poistetaan ja betonin ulkopintaan laitetaan 130 mm mineraalivillaa. Ilmavälin ja mineraalivillan väliin laitetaan tuulensuojalevy, joka wufilla laskettaessa oli kipsilevyä. Tarkasteltava mahdollinen kondensoitunut kohta on tuulensuojalevyn sisäpinnassa mineraalivillan ulkopinnan kohdalla, johon kosteutta kertyy eniten.

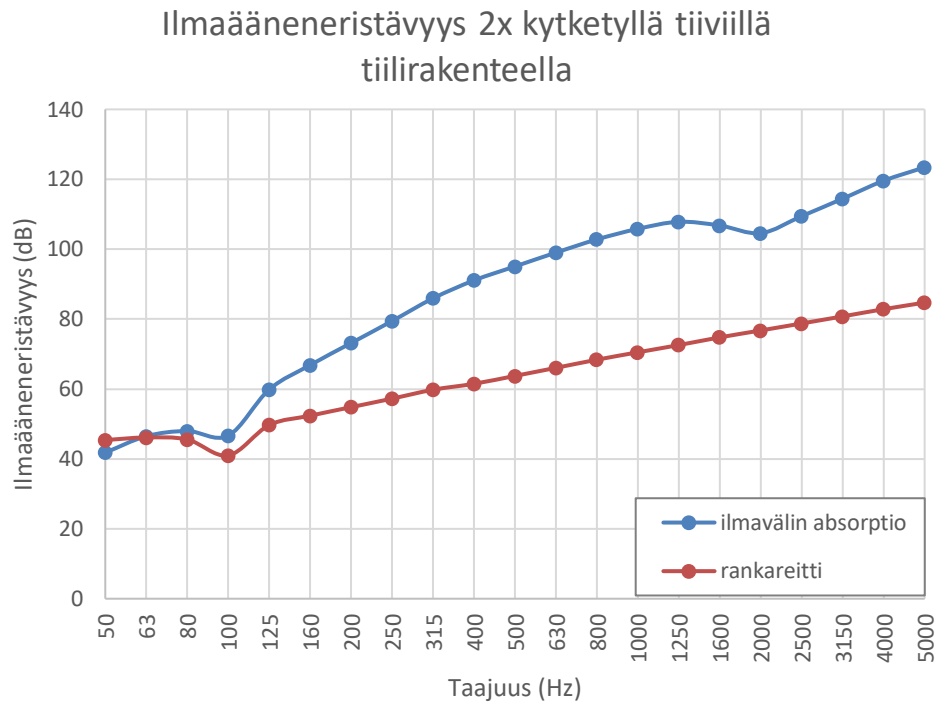
Halkeaman suuruuden vaikutus ilmavirtaukseen tehtiin tietyllä lämpötilalla ja tietyllä suhteellisen kosteuden arvolla, mutta lopuksi päädyttiin laskemaan ilmavirtauksen avulla konvektiolla kulkeutuva kosteusvirta wufista saaduista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoista ajan funktiona. Konvektiolla kulkeutuvaan kosteusvirtaan vaikuttaa sisäilman kosteuslisä, joka on riippuvainen lämpötilasta. Ilmavirran kulkeutuminen halkeamien kautta tehdään wufista saaduilla suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoilla eri ajan hetkillä. Tarkasteluvälinä käytettiin yhden vuoden ajanjaksoa, kun laskettiin konvektiolla kulkeutuvaa kosteusvirtaa. Ulkoilman sääolosuhteina käytettiin sekä Jokioisten että Vantaan nykyajan ilmastoa.

## 10. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

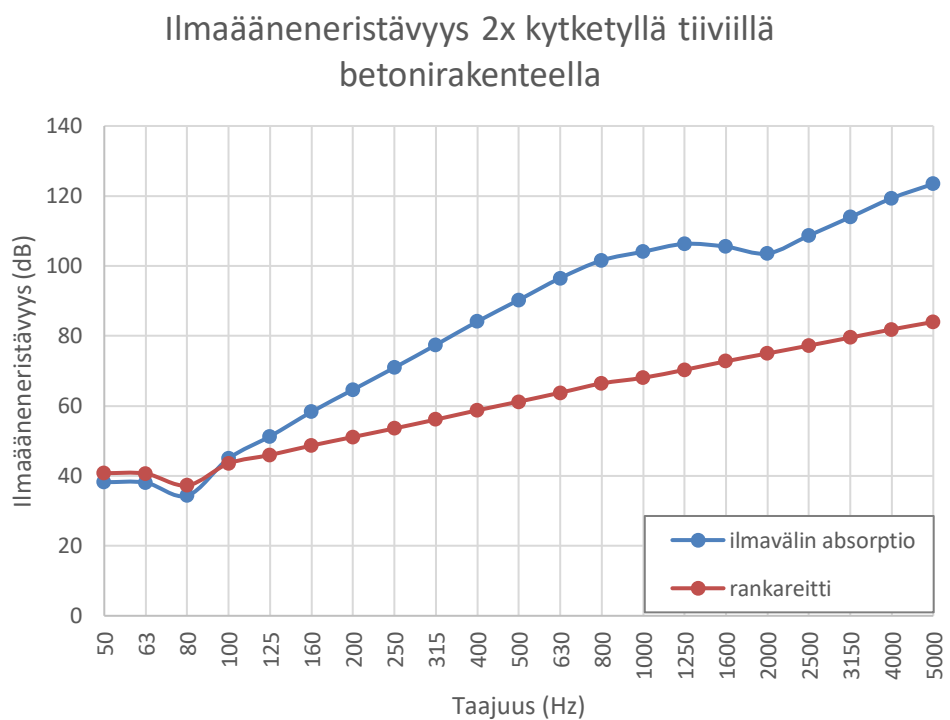
Tässä kappaleessa on esitetty keskeiset tulokset tiiviillä ja epätiiviillä rakenteilla sekä akustiikan että lämmön ja kosteuden siirtymisen kannalta. Tulosten tarkastelussa vertailaan epätiiviestä ja tiivistä rakennetta, ja tarkastellaan epätiiviiin sisäkuoren merkitystä ilmaääneneristävyyteen ja lämmön ja kosteuden siirtymiseen julkisivurakenteessa. Tarkastelukohteena oli kaksi case-kohdetta, tiilimuurirunkoinen ja betonirunkoinen kerrostalon julkisivu, jossa julkisivu puretaan sisäkuoreen asti ja korjataan rakennusfysikaalisesti, akustisesti ja paloturvallisella toimivalla rakenneratkaisulla. Julkisivurakenneratkaisun lisäksi tarkasteltiin mineraalivillaeristeistä rakennetta ilman tiivistä polyuretaanikerrosta. Lopuksi virhetarkastelun avulla pohditaan laskennan epävarmuustekijöitä, jotka voivat mahdollisesti vaikuttaa lopputuloksiin. Laskentatulosten luotettavuus on riippuvainen monista tekijöistä, esimerkiksi epätiiviiin sisäkuoren halkeamien määrästä, halkeamaleveydet, eristeen laatu ja paine-ero.

### 10.1 Rakennusakustinen toimivuus tiiviillä rakenteilla

Rakennusakustinen toimivuus tarkasteltiin ensin tiiviillä rakenteella. Yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyksien avulla saadaan määritettyä kytkemättömän kaksinkertaisen levyrakenteen ilmaääneneristävyys. Ilmaääneneristävyyteen vaikuttaa ilmavälissä oleva ääntä absorboiva mineraalivillaeriste ja julkisivurakennekiinnikkeet, joiden kautta ääntä kulkeutuu rankareittinä. Polyuretaani on tiivis, joten sillä ei ole heikentävää vaikutusta absorptioon kautta. Kun rankareitti ja mineraalivillan absorptio on huomioitu, saadaan kaksinkertainen ilmaääneneristävyys tiiviillä rakenteella, joka on tiilirakenteen osalta esitetty kuvassa 28 ja betonirakenteisella kuvassa 29.

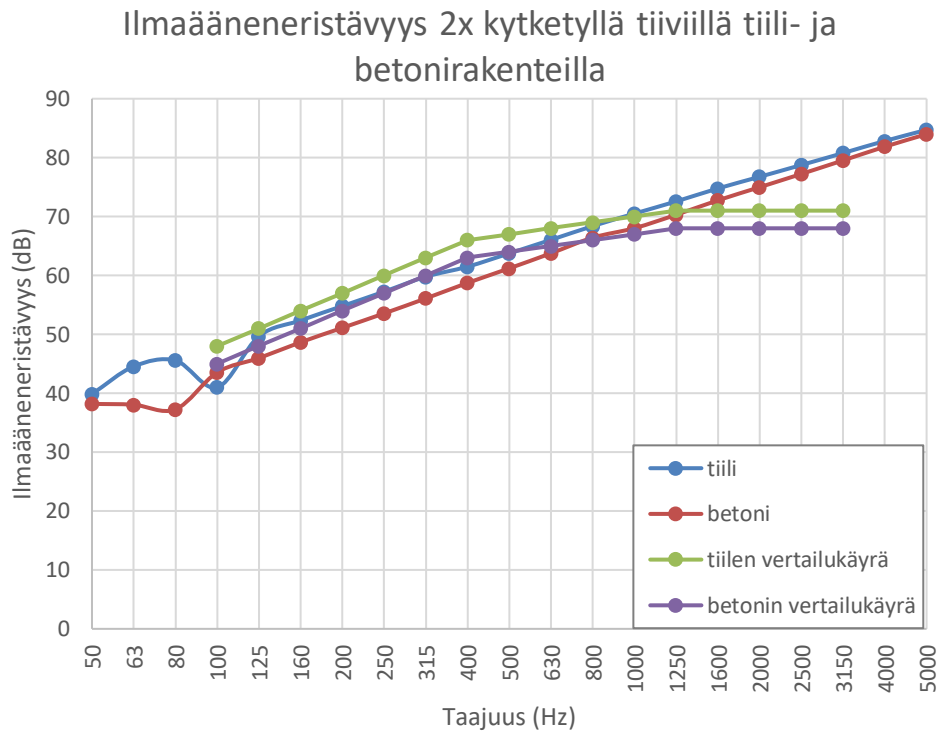


**Kuva 28.** Tiiviin tiilirunkoisen rakenteen ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella.



**Kuva 29.** Tiiviin betonirunkoisen rakenteen ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella.

Tiilirakenteen ilmastäneristävyyks kaksinkertaisella kytkeytällä rakenteella on enemmän riippuvainen rankareitistä. Pienimmällä 50 Hz taajuusalueella ilmastälin absorptio ja rankareitin vaikutus on lähimpänä toisiaan, jolloin ilmastälin absorptio on rankareittiä määrittävämpi tekijä ilmastäneristävyyksarvojen suuruuteen. Kuvassa 30 on esitetty lopullinen tiili- ja betonirakenteiden ilmastäneristävyyks taajuuden funktiona kytkeytällä tiiviillä rakenteella.

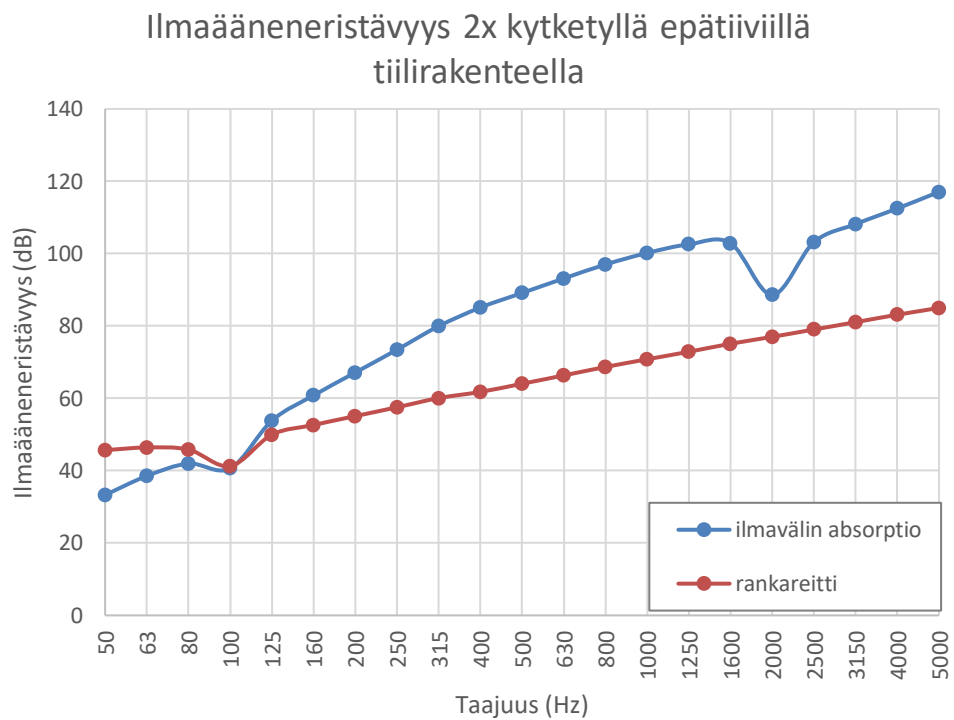


**Kuva 30.** Tiiviiden tiili- ja betonirunkoisten rakenteiden ilmastäneristävyydet taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytkeytällä rakenteella.

Tiili- ja betonirunkoisten rakenteiden ilmastäneristävyydet taajuuden funktiona määritetään vertailukäyrän mukaan. Ilmastäneristävyykskäyrä määrittäytyy ilmastälin absorptio ja rankareitin minimiarvoista. Sekä tiili- että betonirakenteilla rankareitistä muodostui määrittävämpi, joten ilmastäneristävyyks on käytännössä rankareitin ilmastäneristävyyks taajuuden funktiona. Ainoastaan aivan pienimmillä taajuuksilla ilmastälin absorptio on määrittävämpi. Vertailukäyrän ja ilmastäneristävyykskäyrän väliin jäävä pinta-ala saa olla enintään 32 dB. Lopullinen ilmastäneristävyyden arvo luetaan 500 Hz taajuuden kohdalla. Taajuuden 500 Hz kohdalla tiilen ilmastäneristävyydeksi saadaan  $R_{\text{tiili}}=67$  dB ja betonin  $R_{\text{betoni}}=64$  dB.

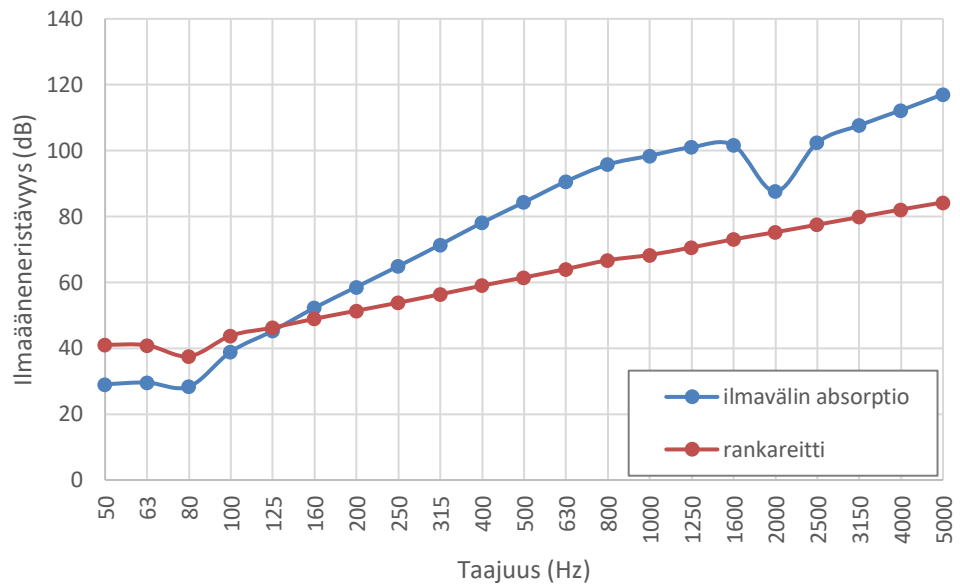
## 10.2 Rakennusakustinen toimivuus epätiivillä rakenteilla

Tiiviiden julkisivurakenteiden lisäksi rakennusakustista toimivuutta tarkasteltiin epätiivillä rakenteilla. Laskentaprosessissa epätiivin sisäkuoren vaikutus huomioidaan laske-  
malla ensin viivamaisen halkeaman vaikutus yksinkertaisen tiilirakenteen ilmaääneneris-  
tävyuteen. Sen jälkeen laskentaprosessi etenee samoin kuin tiiviillä rakenteilla eli yksin-  
kertaisten levyrakenteiden ilmaääneneristävyysien avulla lasketaan kytkemätön kaksin-  
kertaisen levyrakenteen ilmaääneneristävyys. Kytkemättömän kaksinkertaisen rakenteen  
ilmaääneneristävyteen huomioidaan materiaalin ilmvälin absorptio ja rankareitin vai-  
kutusta, mutta epätiivin sisäkuoren halkeamat vaikuttavat ainoastaan ilmvälin absorptio-  
on ja sitä kautta ilmaääneneristävyuteen. Rankareitin ilmaääneneristävyys ei ole sisä-  
kuoren halkeamista riippuvainen. Kaksinkertaisen kytketyn rakenteen ilmaääneneristä-  
vyudet taajuuden funktiona on esitetty epätiivillä tiilisisäkuorella kuvassa 31 ja betoni-  
sisäkuorella kuvassa 32.



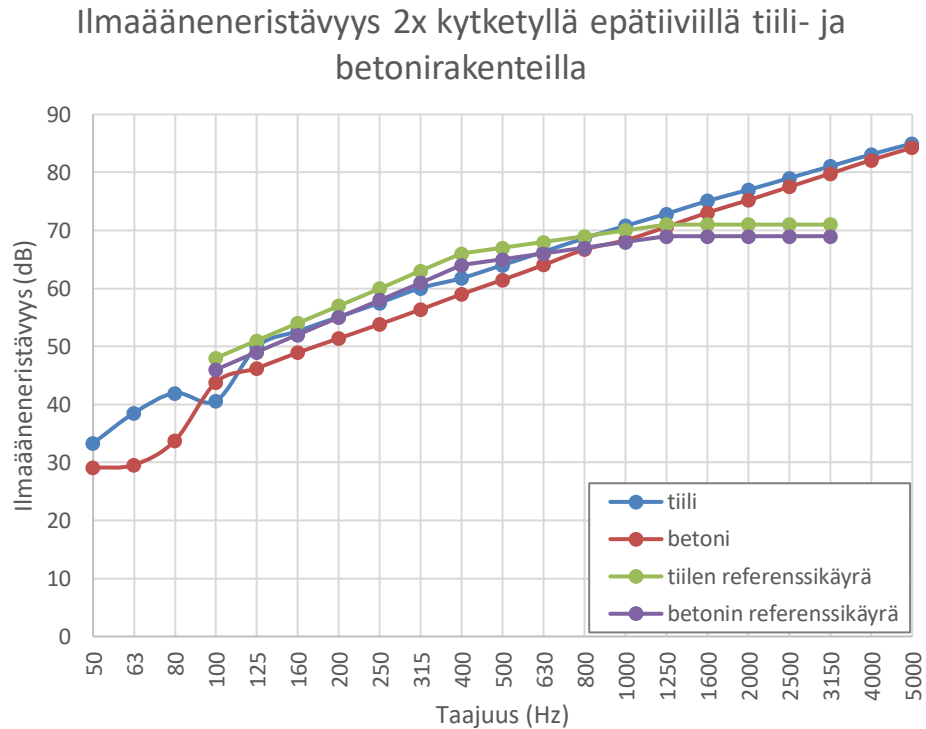
**Kuva 31.** Epätiivin tiilirunkoisen rakenteen ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella.

### Ilmaääneneristävyys 2x kytketyllä epätiivillä betonirakenteella



**Kuva 32.** Epätiivin betonirunkoisen rakenteen ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella.

Ilmaääneneristävyydet taajuuden funktiona epätiivillä sisäkuorilla vastaavat tiiviiden sisäkuorten tilannetta. Sekä tiili- että betonisisäkuorirakenteilla rankareitin kautta kulkeva ääni muodostuu määräävämmäksi kuin ilmavälin absorptio vaikutus. Pienemmillä taajuuksilla ilmavälin absorptio on määräävämpi kuin rankareitti. Lisäksi pienimmillä taajuuksilla ilmavälin absorptio epätiivillä rakenteilla on pienempi kuin vastaava tiiviiden rakenteiden ilmavälin absorptio johtuen halkeamien vaikutuksesta. 50 Hz taajuudella tiiviillä rakenteilla ilmavälin absorptiosta aiheutuva ilmaääneneristävyys on 40 dB luokkaa, kun taas epätiivillä rakenteilla 30 dB luokkaa. Suuremmilla taajuuksilla rankareitti on määräävämpi, kun ilmavälin absorptio arvot ovat suuremmat kuin rankareitin ilmaääneneristävyyssarvot. Kuvassa 33 on esitetty määräävämpi ilmaääneneristävyys eli rankareitistä aiheutuva ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona kaksinkertaisilla kytketyllä epätiivillä tiili- ja betonirakenteilla.



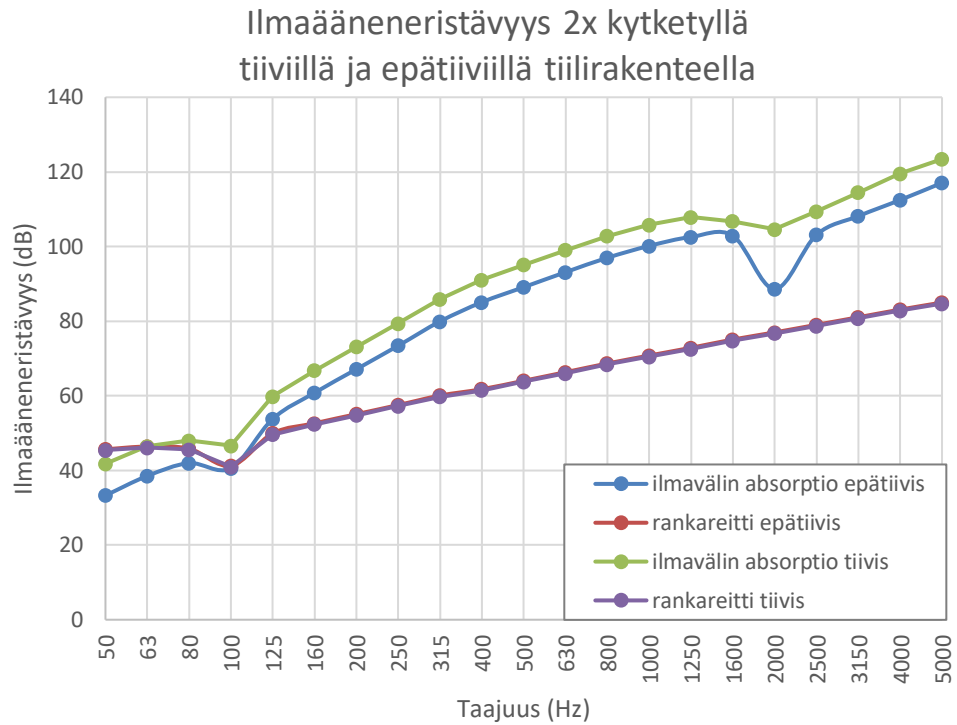
**Kuva 33.** Epätiivien tiili- ja betonirunkoisten rakenteiden ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella.

Tiiviin rakenteiden tavoin saadaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta tiilen ilmaääneneristävyydeksi epätiivillä rakenteella  $R_{\text{tiili}}=67$  dB, betoni  $R_{\text{betoni}}=65$  dB. Spektripainotusermit huomioiden ilmaääneneristävyydeksi tieliikennemelua vastaan saadaan sekä tiiviillä että epätiivillä rakenteella  $R_{w,\text{tiili}}+C_{\text{tr}}=59$  dB ja  $R_{w,\text{betoni}}+C_{\text{tr}}=58$  dB. Epätiivis sisäkuori ja halkeamien kautta kulkeutuva ääni ei heikkene ilmaääneneristävyyden arvoa, koska rankareitin kautta kulkeutuva ääni on määräävämpi. Poikkeuksena ainoastaan pienimmät taajuudet, joiden kohdalla ilmapälin absorptio on määräävämpi. Tiilen ja betonin ilmaääneneristävyydsarvot ovat suhteellisen lähellä toisiaan, eikä kohteen 1 ja kohteen 2 välillä ole suuria eroja ilmaääneneristävyydsarvoissa.

Vaikka epätiivillä sisäkuorella on hieman vaikutusta ilmapälin absorptioon suuruuteen, vaikutus tulee ainoastaan pienimmillä taajuuksilla, joten käytännössä rankareitti on määräävämpi eikä epätiivillä sisäkuorella ole vaikutusta lopullisiin ilmaääneneristävyydsarvoihin. Halkeaman parametrin ja halkeamien määrä vaikuttavat heikentävästi ilmaääneneristävyyteen, mutta rankareitin kautta kulkeva ääni on huomattavan paljon alhaisempi verrattuna ilmapälin absorptioon, joten pieni halkeaman leveyden tai halkeamamäärien kasvu ei vielä muuta ilmaääneneristävyyden tulosta.

Epätiivin sisäkuoren vaikutusta on vertailtu kuvassa 34 tiilirunkoisen kohteen 1 tapauksessa.

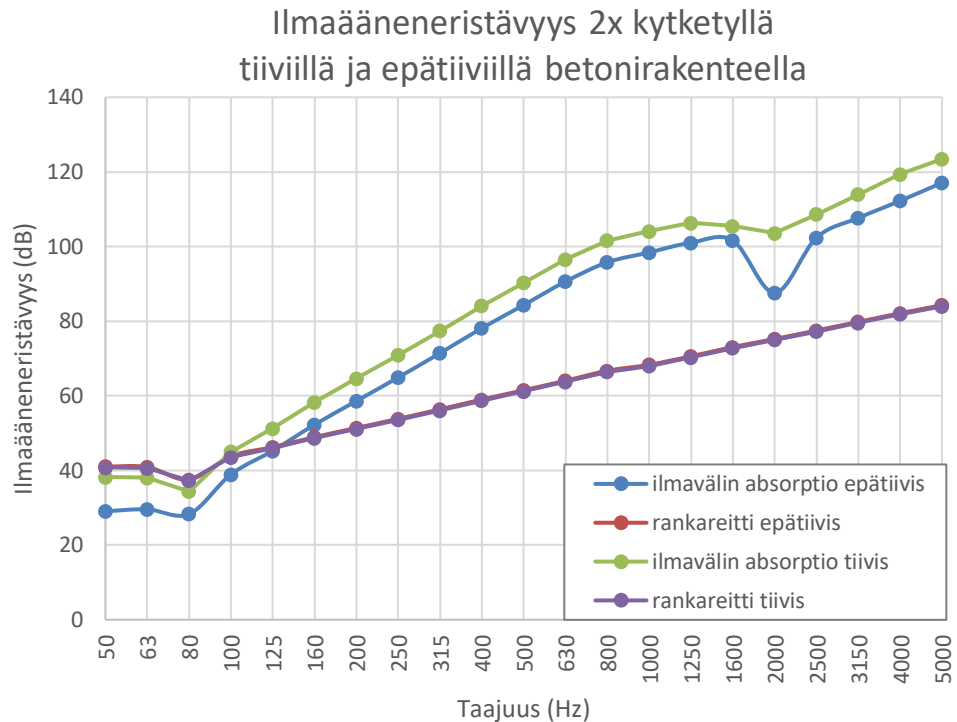




**Kuva 34.** Epätiivisiin ja tiiviisiin tiilirunkoisien rakenteiden ilmaääneneristävyyden taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella.

Kun verrataan epätiivisiin sisäkuoren ilmaääneneristysarvoja tiiviin rakenteen ilmaääneneristävyyssarvoihin, havaitaan rankareitin olevan sekä tiiviillä että epätiivillä määräävin tekijä ilmaääneneristävyyteen. Epätiivisiin ja tiiviisiin rakenteiden ilmaääneneristävyyssarvot eivät poikkea toisistaan toisin kuin ilmavälin absorptiion tapauksessa. Ilmavälin absorptioon epätiivillä sisäkuorella on suurin vaikutus, mutta koska rankareitin vaikutus on määräävä tekijä, ei ilmavälin absorptiion heikentymisellä ole merkitystä lopputuloksen kannalta. Ainoastaan aivan pienimmillä taajuuskaistoilla ilmavälin absorptioarvot voivat olla rankareitin ilmaääneneristävyyssarvoja pienempiä, mutta tiilirunkoisien kohteen 1 tapauksessa ero ilmavälin absorptiion ja rankareitin välillä on erittäin pieni.

Kuvassa 35 on esitetty betonirunkoisella rakenteella vastaava epätiivisiin ja tiiviisiin rakenteiden ilmaääneneristävyys kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella.



**Kuva 35.** Epätiivisiin ja tiiviisiin betonirunkoisien rakenteiden ilmaääneneristävyyden taajuuden funktiona kaksinkertaisella kytketyllä rakenteella

Myös betonirunkoisella rakenteella havaitaan, että rankareitin vaikutus ei riipu sisäkuoren tiiveydestä. Ilmavälin absorptioon epätiivillä sisäkuorella on merkitystä. Verrattuna tiilirunkoiseen rakenteeseen betonirunkoisien rakenteiden kohdalla ilmaääneneristävyyttä määrätty rankareitin vaikutuksesta samoin kuin tiilirunkoisella rakenteella. Pienimmillä taajuuksilla ilmavälin absorptio on määräävämpi. Käytännössä kuitenkin sekä tiili- että betonirunkoisilla rakenteilla rankareitti on selkeästi määräävämpi tekijä ilmaääneneristävyyttä määritettäessä, ettei ilmavälin absorptiolla ja siihen vaikuttavalla epätiivillä sisäkuorella ole juurikaan merkitystä lopullisiin ilmaääneneristävyyssarvoihin.

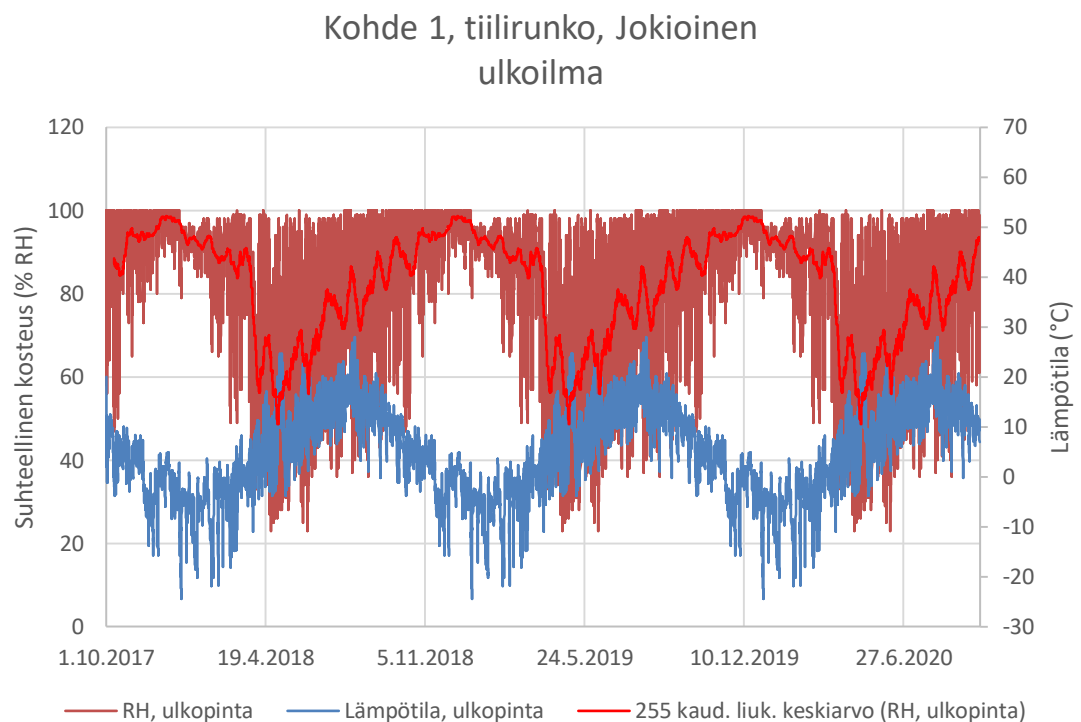
Ilmaääneneristävyyssuhteissa on tehty oletuksia halkeamaleveydestä ja halkeamien määristä eikä esimerkiksi mineraalivillaaeristeen laatua ole huomioitu, mutta näillä oletuksilla epätiivisiin sisäkuoren vaikutus ilmaääneneristävyyssarvoihin on sen verran selkeä, että halkeamaleveydet pitäisi kasvaa paljon suuremmiksi, jossa epätiivillä sisäkuoren halkeamilla olisi merkitystä lopputuloksiin.

### 10.3 Rakennusfysikaalinen toimivuus tiiviillä rakenteilla

Sekä tiilimuurirunkoisesta että betonirunkoisesta kohteen homeutumisherkkyysluokaksi valittiin luokka 3 ja homeutumisen taantumaluokaksi luokka 2. Kosteuden ja lämpötila-arvot laskettiin wufilla sekä Jokioisten että Vantaan rakennusfysikaalisilla nykyajan testi-vuosilla. Suurimmiksi homeindekseiksi saatiin tiilimuurirunkoisella Vantaan ilmastolla

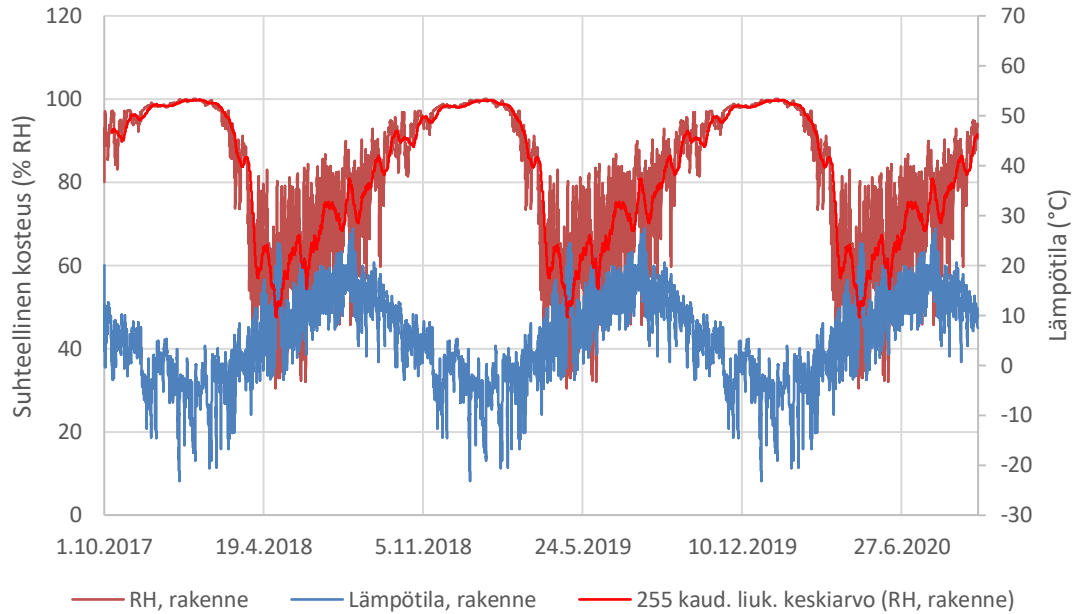
0,025 ja Jokioisten ilmastolla 0,023. Betonirunkoisella suurimmat homeindeksi-arvot olivat Vantaan ilmastolla 0,023 ja Jokioisten ilmastolla 0,017. Homehtumisherkkyysluokalla 3 maksimi homeindeksin arvo on 3,5, joten homeindeksi on paljon alhaisempi kuin maksimihomeindeksi. Betonirunkoisella homeindeksit olivat hieman alhaisempia verrattuna tiilirunkoisen kohteen homehtumisindekseihin, mutta tulokset olivat lähellä toisiaan. Vantaan ilmastolla homeindeksi-arvot olivat hieman suurempia kuin Jokioisten ilmastolla, mutta erot Vantaan ja Jokioisten ilmastolla laskettaessa olivat myös hyvin pienet. Tiili- ja betonirunkoisilla kohteilla homeen kasvun olosuhteet eivät ole suotuisat.

Kuvissa 36-39 on esitetty kohteen 1 tiilirunkoisen julkisivurakenteen suhteellinen kosteus % RH ja lämpötila ajan funktiona. Mallinnuksen tarkastelupisteet on otettu julkisivurakenteen ulkopinnasta ja tuulensuojalevyn sisäpinnasta, ja mallinnukset on tehty sekä Jokioisten että Vantaan nykyajan rakennusfysikaalisilla testivuosilla. Lämmön ja kosteuden siirtymistä tarkasteltiin kolmen vuoden ajanjaksona ja suhteellisen kosteuden määrää tarkasteltiin kolmen vuorokauden keskiarvona.



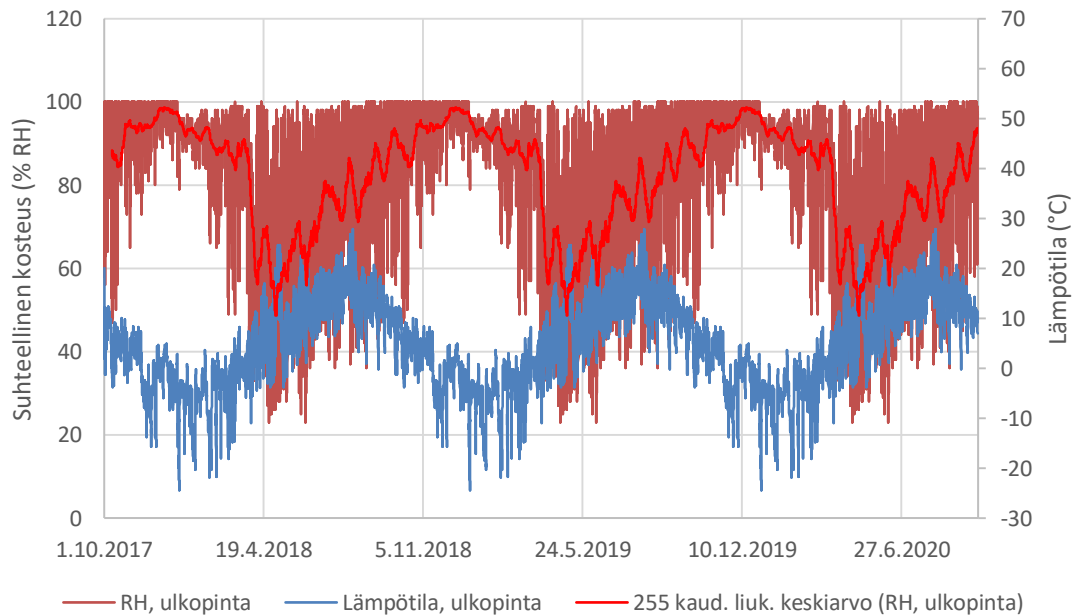
**Kuva 36.** Tiilirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Jokioisten ilmastolla ulkoilmasta tarkasteltuna.

Kohde 1, tiilirunko, Jokioinen  
tuulensuojalevyn sisäpinta



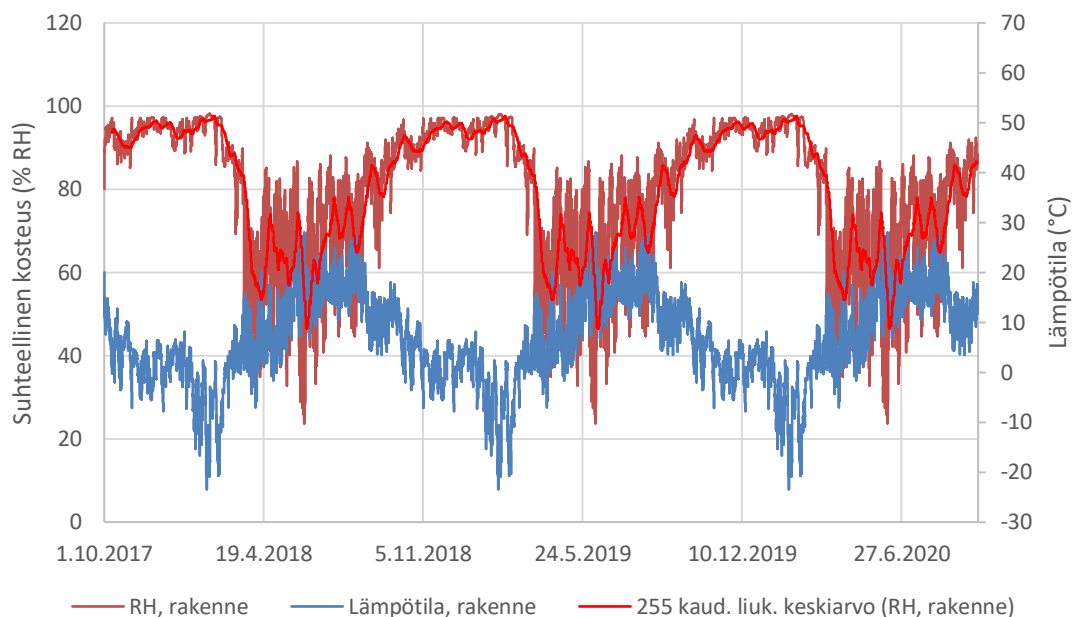
**Kuva 37.** Tiilirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Jokioisten ilmastolla julkisivurakenteesta tarkasteltuna.

Kohde 1, tiilirunko, Vantaa  
ulkoilma



**Kuva 38.** Tiilirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Vantaan ilmastolla ulkoilmasta tarkasteltuna.

Kohde 1, tiilirunko, Vantaa  
tuulensuojalevyn sisäpinta

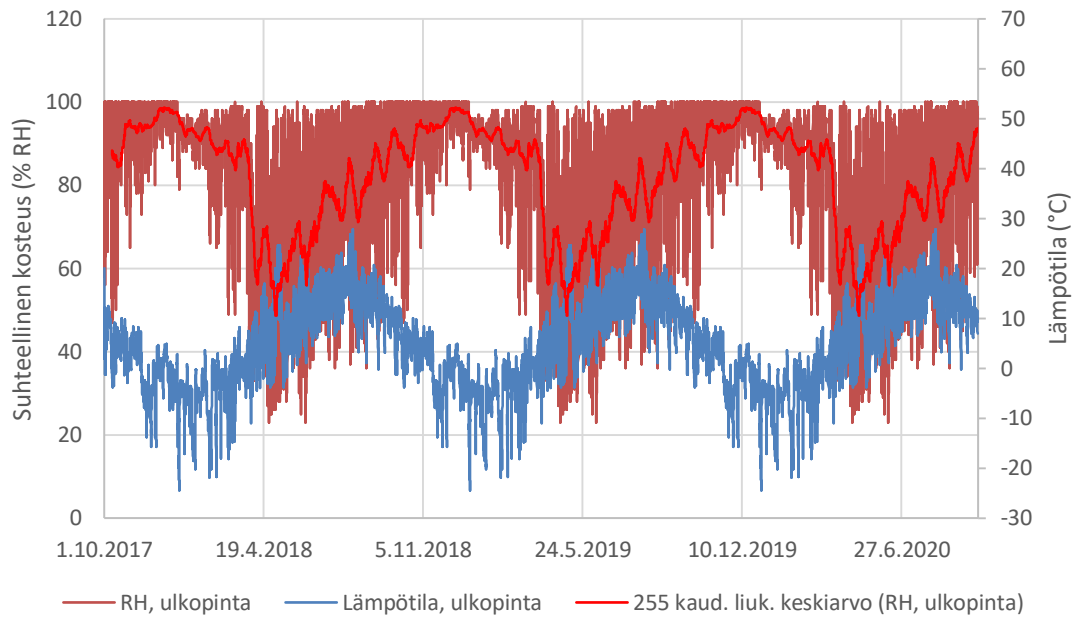


**Kuva 39.** Tiilirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Vantaan ilmastolla julkisivurakenteesta tarkasteltuna.

Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot eivät juurikaan eroa, kun verrataan Jokioisten ja Vantaan ilmastolla laskettuja tuloksia. Sekä ulkoilmassa että julkisivurakenteen rakenteessa suhteellisen kosteuden arvot ovat lähellä sataa prosenttia ja olosuhteet ovat lähellä kondensoitumista. Lämpötila vaihtelee talvella ja kesällä noin  $-30\text{ °C}$  ja  $30\text{ °C}$  välillä. Wufilla saadut tulokset suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta laskettiin diffuusion vaikutuksella. Suhteellisen kosteuden arvot ovat korkeammat talvella kuin kesällä ja kosteuden kondensoituminen rakenteessa on lähellä, koska kylmään ilmaan ei pysty sitoutumaan yhtä paljon kosteutta kuin lämpimään ilmaan. Koska suhteellisen kosteuden arvot ovat pelkästään diffuusiolla lähellä  $100\text{ % RH}$ , kosteuskonvektion lisäyksen myötä rakenteeseen kertyy kosteutta liikaa ilman tiivistä polyuretaanikerrosta. Suhteellisen kosteuden arvot ovat suurimmillaan talvella ja keväällä, kun taas kesäaikaan suhteellinen kosteus laskee alle  $50\text{ % RH}$  arvoihin.

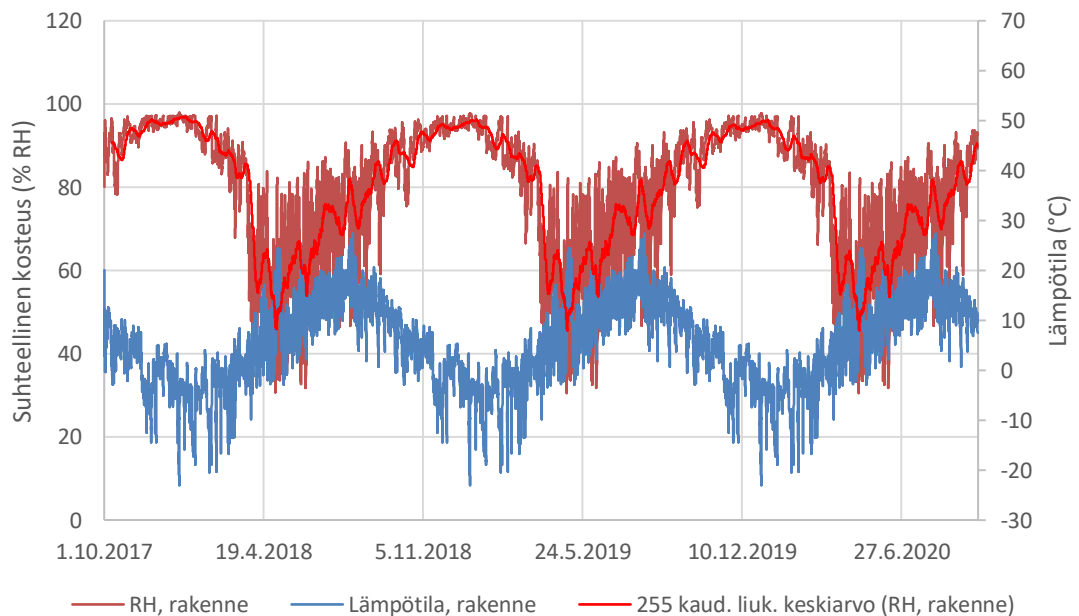
Vastaavasti kuvissa 40-33 on esitetty kohteen 2 betonirunkoisen julkisivurakenteen suhteellinen kosteus  $\text{ % RH}$  ja lämpötila ajan funktiona. Mallinnuksen tarkastelupisteet on otettu julkisivurakenteen ulkopinnasta ja tuulensuojalevyn sisäpinnasta samoin kuin kohteella 1 tiilirunkoisen case-kohteen tapauksessa, ja mallinnukset on tehty sekä Jokioisten että Vantaan nykyajan rakennusfysikaalisilla testivuosilla. Lämmön ja kosteuden siirtymistä tarkasteltiin kolmen vuoden ajanjaksona ja suhteellisen kosteuden määrää tarkasteltiin kolmen vuorokauden keskiarvona.

Kohde 2, betonirunko, Jokioinen  
ulkoilma

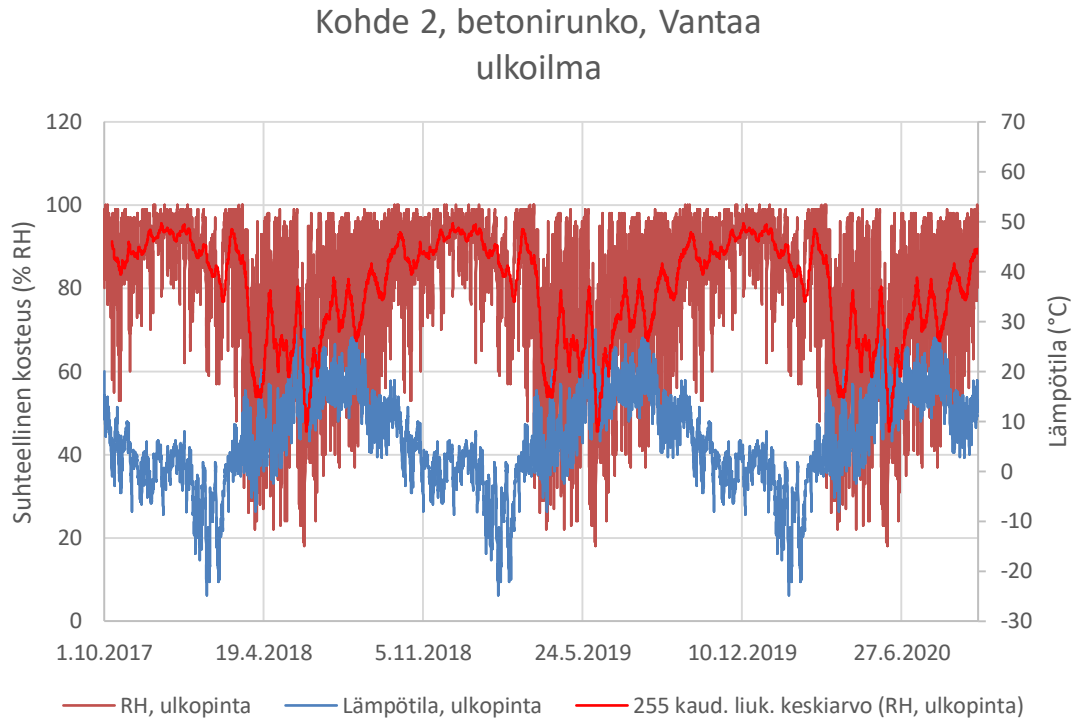


**Kuva 40.** Betonirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Jokioisten ilmastolla ulkoilmasta tarkasteltuna.

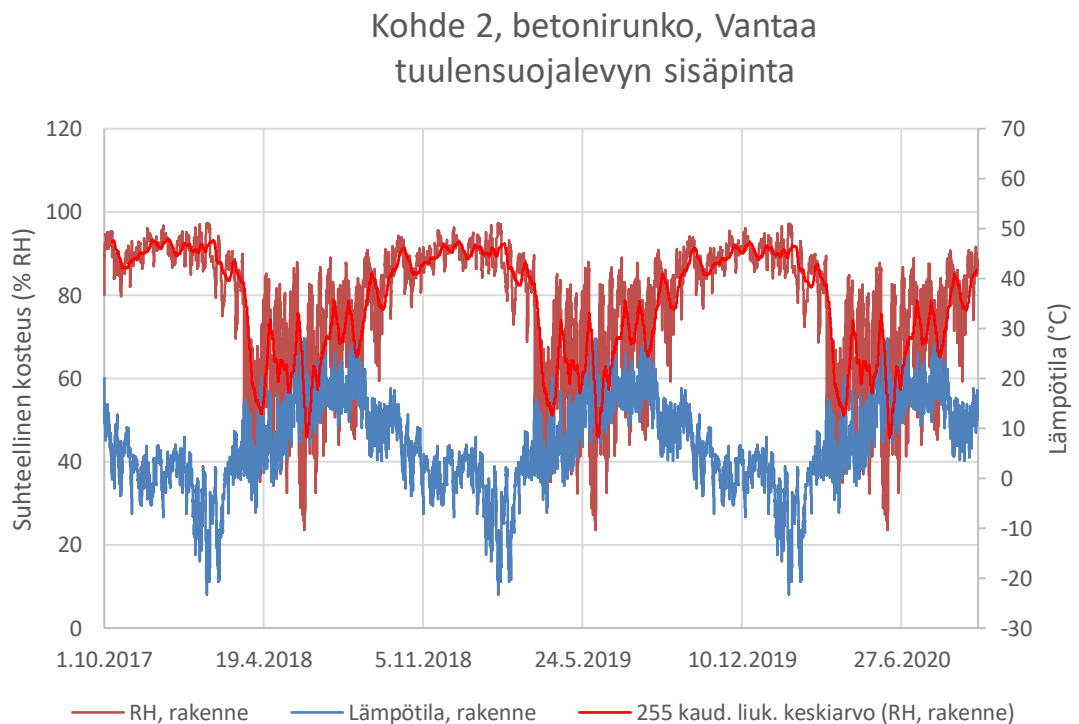
Kohde 2, betonirunko, Jokioinen  
tuulensuojalevyn sisäpinta



**Kuva 41.** Betonirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Jokioisten ilmastolla julkisivurakenteesta tarkasteltuna.



**Kuva 42.** Betonirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Vantaan ilmastolla ulkoilmasta tarkasteltuna.

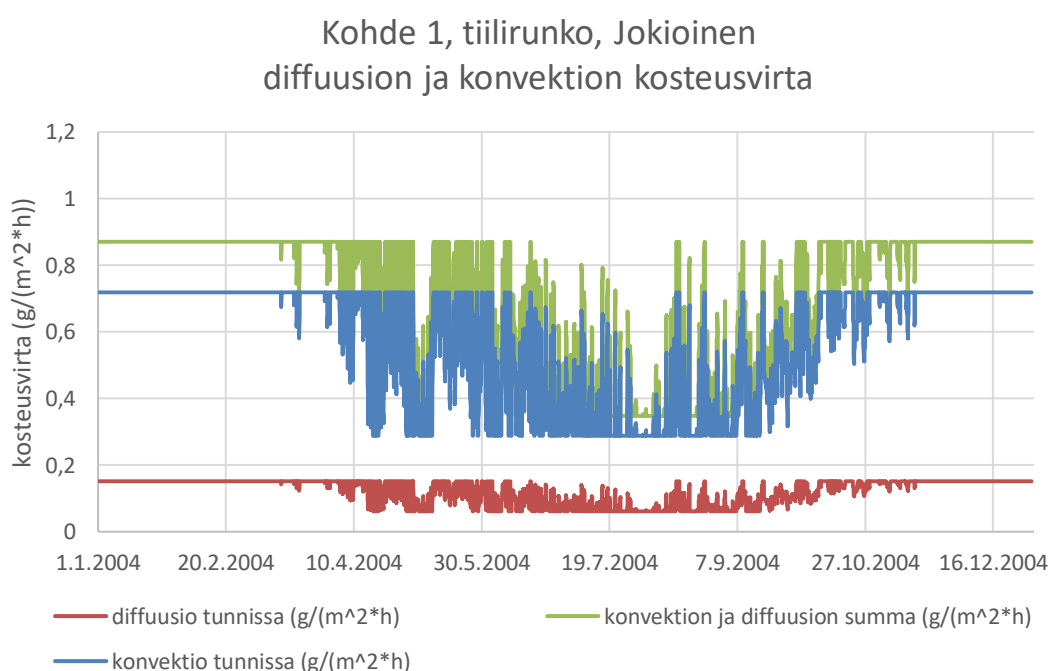


**Kuva 43.** Betonirunkoisen kohteen suhteellinen kosteus ja lämpötila ajan funktiona Vantaan ilmastolla julkisivurakenteesta tarkasteltuna.

Kuten tiilirunkoisella kohteella 1, myös betonirunkoisella julkisivurakenteella suhteellisen kosteuden arvot ovat lähellä kondensoitumista rakenteessa tuulensuojalevyn sisäpinnassa. Lämpötila vaihtelee noin  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  välillä. Suhteellisen kosteuden arvot ovat suurimmillaan talvella ja keväällä, kun taas kesäaikaan suhteellinen kosteus laskee alle 50 % RH arvoihin. Betonirunkoisella julkisivurakenteella tulokset ovat diffuusiolla mallinnettuja, joten suhteellisen kosteuden arvot ovat liian korkeita. Kun huomioidaan konvektion aiheuttama kosteuden siirtyminen, rakenne ei ole riittävä kosteuden ja lämmön siirtymisen kannalta ilman tiivistä polyuretaanikerrosta. Betonirunkoisen rakenteen Jokiosten ja Vantaan olosuhteet eivät poikkea juurikaan keskenään. Verrattaessa betonirunkoisen kohteen 2 suhteellisen kosteuden arvoja kohteen 1 tiilirunkoiseen julkisivurakenteeseen havaitaan, että betonirunkoisella rakenteella suhteellinen kosteus on hieman tiilirunkoista pienempi. Koska tiili on betonia huokoisempaa, kosteutta kertyy tiilirakenteella enemmän tuulensuojalevyn sisäpintaan ja julkisivurakenteen ulkopintaan.

## 10.4 Rakennusfysikaalinen toimivuus epätiivillä rakenteilla

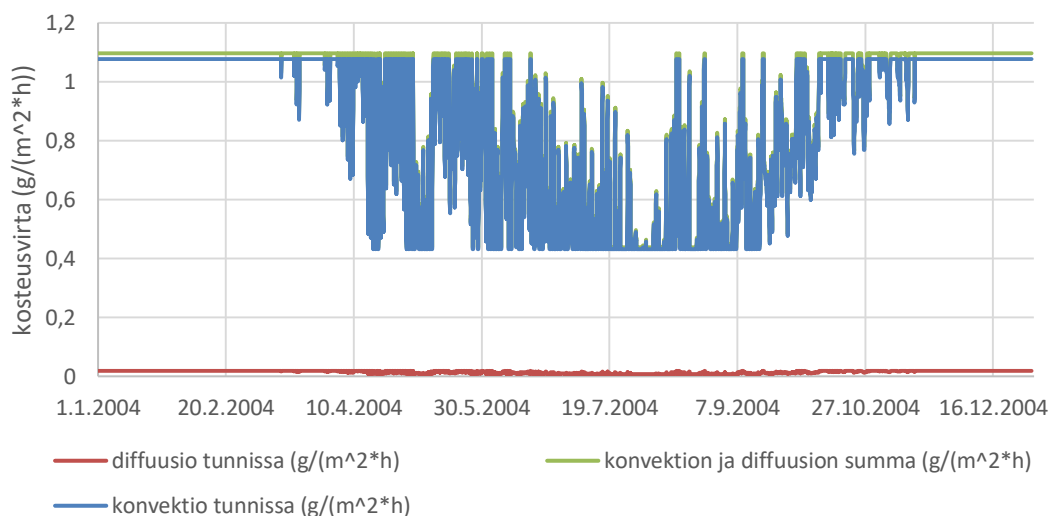
Kuvassa 44 on esitetty tiilirunkoisen kohteen 1 diffuusion ja konvektion kosteusvirrat erikseen ja diffuusion ja konvektion kumulatiivinen kosteusvirta. Kuvassa 45 on esitetty vastaavat diffuusion ja konvektion kosteusvirrat betonirunkoiselle kohteelle 2.



**Kuva 44.** Tiilirunkoisen kohteen diffuusion ja konvektion kosteusvirta Jokioisten ilmastolla.



Kohde 2, betonirunko, Jokioinen  
diffuusion ja konvektion kosteusvirta



**Kuva 45.** Betonirunkoisen kohteen diffuusion ja konvektion kosteusvirta Jokioisten ilmastolla.

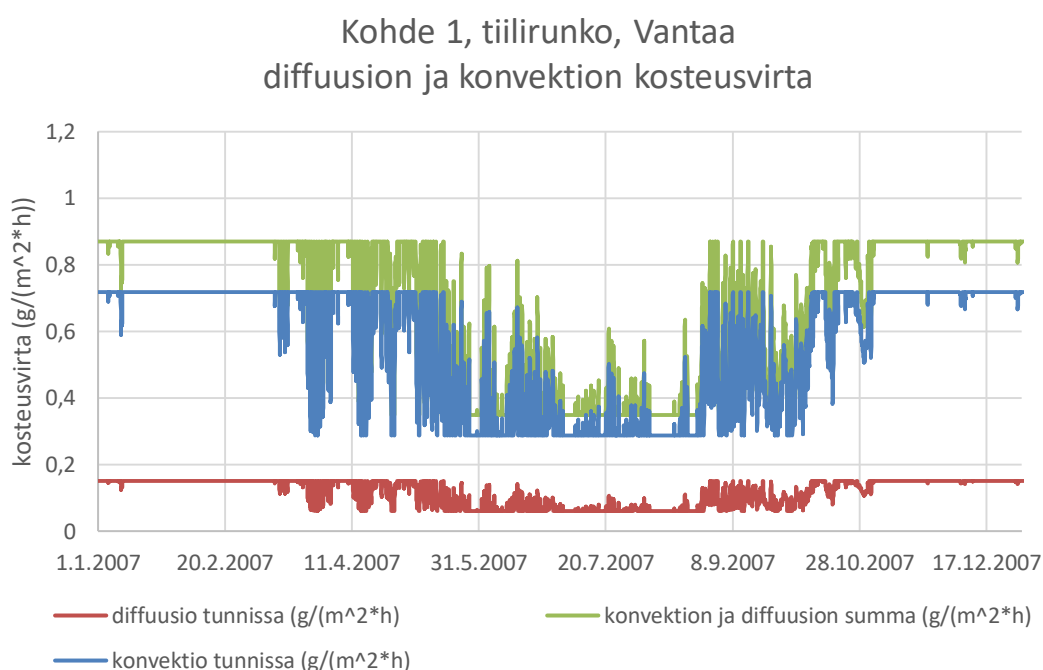
Kosteusvirta on määritetty kuvaajissa grammoina neliötä kohden tunnin aikana. Molemmilla julkisivurakenteilla suurimmat kosteusvirrat saavutetaan talviolosuhteilla, kun taas kesällä kosteusvirran arvo vaihtelee. Tiilirunkoisella julkisivurakenteella diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta on alle  $0,2 \text{ g/(m}^2\text{h)}$  ja konvektiolla siirtyvä kosteusvirta hieman yli  $0,7 \text{ g/(m}^2\text{h)}$ . Tällöin kumulatiivinen diffuusion ja konvektion aiheuttama kosteusvirta on hieman alle  $0,9 \text{ g/(m}^2\text{h)}$ . Betonirunkoisella julkisivurakenteella diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta on alle  $0,02 \text{ g/(m}^2\text{h)}$  ja konvektiolla siirtyvä kosteusvirta hieman alle  $1,1 \text{ g/(m}^2\text{h)}$ . Tällöin kumulatiivinen diffuusion ja konvektion aiheuttama kosteusvirta jää pienemmäksi tiilirunkoisella rakenteella, kun betonirunkoisella rakenteella kosteusvirta on noin  $1,1 \text{ g/(m}^2\text{h)}$ . Prosentuaalisesti betonirunkoisella rakenteella konvektiolla siirtyvän kosteusvirran määrä on valtava verrattuna diffuusiolla siirtyvään kosteusvirtaan, kun taas tiilirunkoisella rakenteella konvektion suhteellinen osuus kokonaiskosteusvirrasta on pienempi. Kuitenkin myös tiilirunkoisella rakenteella konvektion osuus kokonaiskosteusvirran määrästä on moninkertainen verrattuna diffuusiolla kulkeutuvaan kosteusvirran suuruuteen.

Koska konvektiolla kulkeutuva kosteusvirta on moninkertainen diffuusion verrattuna, aiheuttaa epätiivis sisäkuori ongelmia rakenteen kosteus- ja lämpöteknisen toimivuuden kannalta. Kun tiiviillä rakenteilla ainoastaan diffuusion vaikutus aiheutti suhteellisen kosteuden arvon olevan lähellä kondenssia kosteudelle suotuisissa olosuhteissa, lisäävät epätiivisissä sisäkuoressa oleva halkeamat kosteusvirtaa ilmapuotojen kautta. Betonilla diffuusion kautta siirtyvä kosteus on huomattavasti vähäisempää verrattuna huokoiseen tiilisisäkuoreen. Vaikka tiilirunkoisella rakenteella konvektion määrä suhteessa diffuusion

kautta kulkeutuvaan kosteuteen on vähäisempää, kokonaiskosteusvirta on tiilirunkoisella rakenteella suurempi kuin betonirunkoisella.

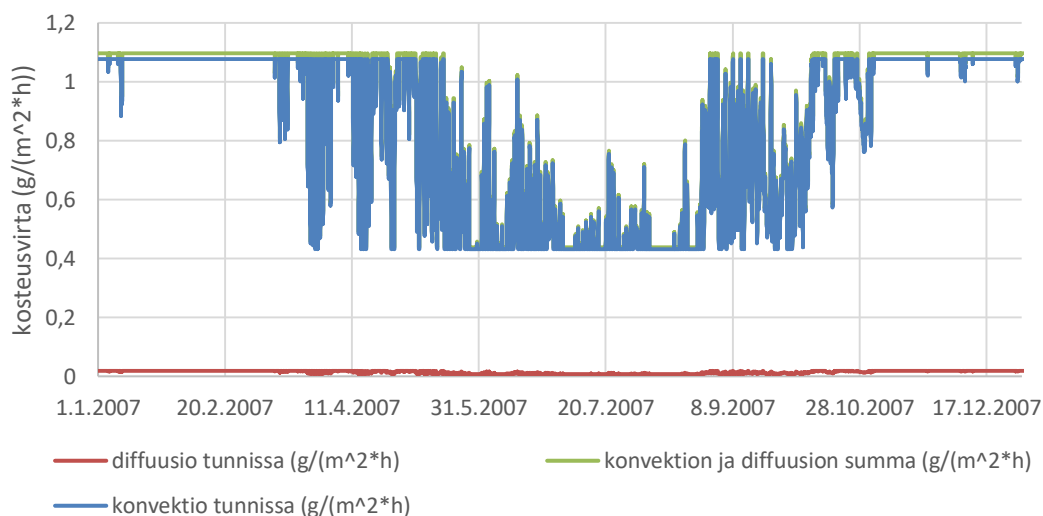
Sisäilman kosteuslisä on  $5 \text{ g/m}^3$ , kun lämpötila on alle  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kun lämpötila on yli  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , kosteuslisä on  $2 \text{ g/m}^3$ . Lämpötilavälillä  $5\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$  kosteuslisä laskee lineaarisesti arvosta  $5 \text{ g/m}^3$  arvoon  $2 \text{ g/m}^3$ . Kosteuslisän määrä selittää vaihtelut kosteusvirran määrässä kesäkuukausina. Kun talvella lämpötila on alle  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , kosteuslisä on maksimiarvossaan  $5 \text{ g/m}^3$ .

Kosteusvirran määrä on  $0,8\text{-}1,1 \text{ g/(m}^2\text{h)}$  välillä tiili- ja betonirunkoisilla epätiiviillä rakenteilla, kun tarkasteluilmastona oli Jokioisten nykyajan ilmasto. Vantaan ilmastolla laskettaessa saadaan vastaavat kosteusvirran määrät, jotka on esitetty tiilirunkoiselle rakenteelle kuvassa 46 ja betonirunkoiselle rakenteelle kuvassa 47.



**Kuva 46.** Tiilirunkoisien kohteiden diffuusion ja konvektion kosteusvirta Vantaan ilmastolla.

Kohde 2, betonirunko, Vantaa  
diffuusion ja konvektion kosteusvirta



**Kuva 47.** Betonirunkoisen kohteen diffuusion ja konvektion kosteusvirta Vantaan ilmastolla.

Myös Vantaan ilmastolla konvektiolla ja diffuusiolla kulkeutuvan kosteuden määrä on samaa suuruusluokkaa. Lisäksi betonirunkoisen rakenteen kosteusvirran määrä on pienempi verrattuna tiilirunkoisen rakenteen kosteusvirtaan, samoin kuin Jokioisten ilmastolla laskettuna. Sekä tiiviillä että epätiiviillä rakenteilla Jokioisten ja Vantaan ilmastossa laskettaessa ei ollut suuria eroja, mutta tarkastelu tehtiin molemmilla rakennusfysikaalisilla testivuosilla Jokioisten ja Vantaan nykyilmastolla.

Havaitaan, että konvektiolla kulkeutuvan kosteusvirran määrä on suuri suhteessa diffuusiolla kulkeutuvaan kosteusvirran määrään. Wufi-tarkastelut osoittivat suhteellisen kosteuden olevan lähellä kondenssia ja epätiivis sisäkuori ja huokoisempi rakenne kerryttävät liikaa kosteutta tuulensuojan sisäpintaan. Lisäksi lämpötilaolosuhteet olivat suotuisat mikrobin ja homeenkasvulle. Jos julkisivurakenteissa on polyuretaanikerros, ei kosteuden kertymistä tapahdu, koska polyuretaanikerros on niin tiivis. Siksi epätiiviillä sisäkuorella ei ole merkitystä kosteuden kondensoitumiseen rakenteeseen, jos julkisivurakenteessa on tiivi polyuretaanikerros. Mineraalivillakerros polyuretaanin sijasta aiheuttaa kuitenkin kondenssia tai olosuhteet ovat niin lähellä kondensoitumista, että rakenne ei ole rakennusfysikaalisesti toimiva tiili- eikä betonisisäkuorella.

Epätiivisiin sisäkuoren halkeamien suuruutta tarkasteltiin ilmapirtauslaskennan yhteydessä. Halkeaman leveys ja rakennuksen paine-erot vaikuttavat ilmapirran ja sitä kautta myös konvektiolla kulkeutuvan kosteusvirran suuruuteen. Halkeaman kautta kulkevan ilmapirran kaksinkertaistuessa kokonaiskosteusvirran määrä muuttuu 0,8-1,1 g/(m<sup>2</sup>h) arvosta noin 1,5 g/(m<sup>2</sup>h) suuruisiksi. Halkeaman määrällä ja halkeamaleveydellä on vaiku-

tusta kosteusvirtaan ja sitä kautta koko julkisivurakenteen rakennusfysikaaliseen toimivuuteen. Halkeaman ja ilmavuodon suuruutta pystytään kuitenkin hallitsemaan suunnitteleamalla julkisivurakenteeseen tiivis höyrynsulku, jolloin halkeamakorjauksia tärkeämpää on esimerkiksi tiivis polyuretaanikerros epätiivisiin sisäkuoren ulkopuolella.

## 10.5 Virhetarkastelu

Erilaiset yksinkertaistukset ja oletukset lisäävät virheiden määrää lopullisiin tuloksiin. Mallinnustulosten luotettavuuden arviointi on hankalampaa, kun kenttämittauksia ei ole mallinnuksen ja laskentatulosten tueksi. Tulokset olisivat luotettavampia, jos laskentojen tuloksia pystyttäisiin vertailemaan kenttämittauksiin. Laskentatuloksissa yksinkertaistuksia on pyritty tekemään konservatiivisempaan suuntaan, jolloin mahdollinen yksinkertaistuksista aiheutuva virhe ei vaikuta tulosten analysoimiseen.

Akustiikkalaskennassa sisäkuoren halkeaman vaikutusta laskettiin Gomperts ja Kihlmanin teorian avulla. Viivamaiselle raolle on myös monimutkaisempi Mechelin malli. Eri laskentateoriat saattavat johtaa hieman eri tuloksiin, mutta eri laskentateorian käyttäminen ei kuitenkaan johda eri lopputulokseen, sillä tulokset ovat suhteellisen lähellä toisiaan riippumatta käytetystä viivamaisen raon laskentateoriasta.

Tähän diplomityöhön valittiin halkeamaksi keskellä julkisivurakennetta oleva ja koko sisäkuoren paksuinen yksi 1 mm halkeama, jota vertailtiin tiiviiseen rakenteeseen molemmilla case-kohteilla. Todellisuudessa halkeamat voivat olla julkisivurakenteen reunassa tai eivät välttämättä ole koko sisäkuoren paksuisia. Lisäksi halkeamia voi olla useita pienempiä. Kuitenkin tarkasteltaessa eri laskentaparametrien vaikutusta, esimerkiksi halkeamaleveyden kasvattaminen ei vaikuttanut lopputulokseen, vaikka halkeama olisi ollut 10 mm leveä. Määrävämpi ilmaääneneristävyyden kaava ei päde ja leveillä raoilla laskennan tulosten luotettavuus on epävarmempi kuin kapeammilla raoilla [6].

Ilmavirtauksen määrittämisessä laskennat tehtiin 2-dimensionaalisella rakenteella. Todellinen rakenne on kuitenkin kolmiulotteinen, mikä lisää epäideaalisten virtausreittien määrää. Halkeamien kautta kulkeva ilmavirtaus ja siitä laskettu konvektiolla siirtyvä kosteusvirran määrä on riippuvainen valitusta muun muassa paine-erosta ja halkeamaleveydestä. Laskentaan valittiin 1 mm leveä halkeama ja 5 Pa paine-ero. Todellisuudessa halkeamien leveys paine-ero voivat vaihdella, mikä vaikuttaa kosteusvirran suuruuteen. Täysin absoluuttisia tuloksia ei näillä laskennoilla saada, mutta kun huomioidaan ilmavirtauksen avulla saatu konvektiolla kulkeutuva kosteusvirran määrässä virhemarginaali, pystytään kuitenkin tekemään johtopäätökset julkisivurakenteen rakennusfysikaalisesta toimivuudesta.

Rakennusfysikaalisessa tarkastelussa laskennoissa käytetyt julkisivurakenteiden materiaaliominaisuudet on otettu wufi-ohjelman kirjastosta, missä materiaaliparametrit eivät

täysin vastaa julkisivun uusimISRatkaisuissa käytettyjä materiaalien ominaisuuksia. Jokaiselle rakennusmateriaalille ei löydy juuri case-kohteeseen suunniteltua materiaalia, jolloin materiaaliominaisuudet eivät välttämättä ole täsmälleen samat kuin mitä tuotevalmistajan sivuilla olevat materiaaliparametrit. Materiaaliominaisuudet ovat kuitenkin riittävän lähellä tuotevalmistajan sivuilla olevia arvoja, joten virheen määrä ei ole kovin suuri, eikä tulosten luotettavuus tämän takia heikkene.

Täysin eksakteja arvoja wufilla mallinnettaessa ei kuitenkaan saada, koska materiaaliparametrien lisäksi laskennan mallintamisessa on tehty yksinkertaistuksia esimerkiksi jättämällä tuuletusvälin ulko-osa mallintamatta. Tuuletusvälin ilmavirtausten mallintaminen todellisuutta vastaavaksi on haastavaa, minkä takia tuuletusväli jätettiin mallintamatta. Lisäksi julkisivurakenteen rajapintojen epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat virhettä wufilla mallinnettaessa.

Kun otetaan huomioon mahdolliset virheet, havaitaan tuloksista kuitenkin julkisivurakenteiden kondensoitumisriski ja mahdollinen homeenkasvu homeindeksitarkastelun avulla, vaikka täysin absoluuttisia arvoja kosteuden ja lämmön siirtymiselle ei saavutetakaan. Lisäksi julkisivurakenteen ilmastoineristävyyttä saadaan tarkasteltua laskennallisesti, mutta todellisuudessa rakenteessa voi havaitsemattomia ilmavuotokohtia, jolloin todellisuudessa ilmastoineristävyyden arvo voi olla heikompi kuin mitä matemaattisesti saadaan tarkasteltua. Kun laskennallisiin tarkasteluihin otettaisiin mukaan kohteissa tehdyt mittaukset, saadaan laskentatuloksia entistä luotettavammiksi.

## 11. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tarkasteltiin julkisivukorjauskohteita, joissa julkisivu puretaan sisäkuoreen asti ja uusitaan kokonaan. Julkisivukorjauskohteista valittiin kaksi esimerkkikohtetta, joissa kohteessa 1 oli tiilisisäkuori ja kohteessa 2 betonisisäkuori. Tavoitteena oli pohtia julkisivurakennevaihtoehtojen toimivuutta rakennusfysiikan, akustiikan ja paloturvallisuuden kannalta tilanteessa, jossa sisäkuori on epätiivis esimerkiksi sisäkuoreessa olevien halkeamien tai huokoisemman tiilen takia.

Epätiivin sisäkuoren vaikutus rakennusakustiikkaan ja ilmaääneneristävyyteen tehtiin laskennallisella tarkastelulla. Ensin tarkasteltiin tiiviin rakenteen ilmaääneneristävyyttä laskemalla kaksinkertaisille kytkemättömille rakenteille ilmaääneneristävyys, ja sen jälkeen lasketaan ilmaääneneristävyys kaksinkertaisille kytketyille julkisivurakenteille huomioimalla ilmapälin absorptio ja rankareitin vaikutus. Epätiivin sisäkuoren ilmaääneneristävyyttä laskettiin Gomperts ja Kihlmanin viivamaisen raon ilmaääneneristävyyden laskentateorian avulla [6]. Viivamaisen raon kautta kulkeutuva ääni huomioitiin yksinkertaisten tiili- ja betonisisäkuorten ilmaääneneristävyydessä, minkä jälkeen sisäkuoren halkeamien vaikutus huomioidaan ilmapälin absorptio ilmaääneneristävyydessä. Rankareitti eli julkisivurakenteiden kiinnikkeiden kautta kulkeutuvaan ääneen sisäkuoren halkeamilla ei ole merkitystä. Muuten laskentaprosessi eteni tiiviin rakenteiden ilmaääneneristävyyden laskennan tavoin. Lopullinen ilmaääneneristävyys taajuuden funktiona saadaan ilmapälin absorptio ja rankareitin minimiarvoista.

Sekä tiiviillä että epätiivillä sisäkuorilla rankareitti muodostui määräävämmäksi reitiksi kuin ilmapälin absorptio ilmaääneneristävyydet, koska rankareitin ilmaääneneristävyydet olivat ilmapälin absorptio ilmaääneneristävyyden arvoja pienempiä. Lopullinen ilmaääneneristävyys muodostui näin ollen rankareitin ilmaääneneristävyyden arvoista sekä tiiviillä että epätiivillä rakenteilla. Ainoastaan pienimmillä taajuuksilla ilmapälin absorptio oli rankareittiä määrävämpi. Koska rankareitti oli määrävämpi tekijä ilmaääneneristävyydessä ja sisäkuoren halkeamat vaikuttavat ainoastaan ilmapälin absorptio ilmaääneneristävyyteen, ei sisäkuoren halkeamilla ole vaikutusta mahdolliseen ilmaääneneristävyyden heikkenemiseen rankarakenteisten julkisivujen korjausten yhteydessä. Vaikka halkeaman leveyttä kasvatettaisiin, ei pienillä halkeamamäärien muutoksilla vielä ole vaikutusta ilmaääneneristävyyteen, sillä rankareitin ääneneristävyyden arvot olivat 1 mm halkeamaleveydellä tarkasteltaessa vielä huomattavasti alhaisempia verrattuna ilmapälin absorptio ääneneristävyyden arvoihin.

Epätiivin sisäkuoren vaikutusta tarkasteltiin myös rakennusfysiikallisesti lämmön ja kosteuden siirtymisen kannalta. Wufi 2D-ohjelmalla mallinnettiin tiiviin julkisivurakenteen lämmön ja kosteuden siirtymistä rakenteessa. Tarkastelukohdiksi otettiin ulkoilma ja tuulensuojalevyn sisäpinta, joista tarkasteltiin diffuusiolla siirtynyttä kosteusvirran määrää.

Tiiviille rakenteille laskettiin homeindeksi-arvot, joiden avulla tarkasteltiin julkisivurakenteiden mahdollista riskiä homeenkasvulle. Homeindeksi-arvot olivat tiiviillä rakenteilla lähellä nolla, joten riskiä homeenkasvulle ei ollut. Rakennuksien ilmapuotokohtien ja sisäkuoren halkeamien kautta siirtyvää ilmavirran määrää arvioitiin 5 Pa paine-erolla ja 1 mm leveällä halkeamalla. Saadun ilmavirran määrällä laskettiin konvektion halkeamien kautta kulkeutuvan kosteusvirran määrä. Konvektiolla siirtyvän kosteusvirran ja wufilla laskettua diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran määriä vertailemalla saatiin suuruusluokka sisäkuoren halkeamien vaikutukselle julkisivurakenteessa.

Tiiviillä rakenteilla tiivis polyuretaanikerros tiili- ja betonisisäkuorten ulkopinnassa estää vesihöyryn kondensoitumisen rakenteeseen. Lisäksi tarkasteltiin myös julkisivurakennetta, jossa polyuretaanin sijaan käytettäisiin paksumpaa mineraalivillakerrosta. Tällöin julkisivurakenteen U-arvo on sama, mutta kosteusvirran siirtymisen määrän avulla tarkasteltiin epätiivimmän rakenteen toimivuutta julkisivurakennevaihtoehdoksi. Paksummalla mineraalivillakerroksella tuulensuojan sisäpinnasta tarkasteltuna homeindeksi on lähellä nollaa, jolloin riskiä homeenkasvulle ei ole.

Kuitenkin tarkasteltaessa suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja havaitaan sekä tiili- että betonisisäkuorirakenteilla, että suhteellisen kosteuden arvot suhteutettuna lämpötilaan ovat liian korkeita jo diffuusiolla kulkeutuvan kosteusvirran määrillä. Kun huomioidaan epätiivin sisäkuoren vaikutus kosteusvirran määriin, konvektiolla halkeamien kautta kulkeutuva kosteusvirta on moninkertainen verrattuna diffuusiolla kulkevaan kosteusvirtaan. Julkisivurakenne ei ole toimiva ilman polyuretaanikerrosta, sillä jo tiiviillä sisäkuorella suhteellisen kosteuden arvot ovat 90 % RH luokkaa. Kun kosteusvirtatarkasteluihin otetaan huomioon epätiivis sisäkuori ja sen kautta kulkeutuva kosteusvirta, vesihöyryn kondensoituminen rakenteeseen on entistä todennäköisempää. Sisäkuoren halkeamat ovat kriittisiä ilman tiivistä polyuretaanikerrosta, ja suhteellisen kosteuden arvot ovat lähellä 100 % RH aiheuttaen lopulta vesihöyryn kondensoitumista rakenteeseen.

Rakennusfysikaalisen ja -akustisen toimivuuden lisäksi täytyy julkisivukorjauskohteita suunniteltaessa huomioida rakenteellinen paloturvallisuus. Paitsi korjauksen aikana muuttuva palokuorma työmailla myös julkisivurakenteiden materiaalien paloherkkyys ja kykyä luovuttaa lämpöä täytyy huomioida. Palon eteneminen palo-osastosta toiseen täytyy estää esimerkiksi palokatkojen avulla tai suunnittelemalla rakenteet riittävän palonkestäviksi, jotta tulipalon sattuessa ihmiset ehditään evakuoimaan rakennuksesta pois.

Julkisivurakenteita suunniteltaessa täytyy huomioida rakennusfysikaalinen ja -akustinen toimivuus sekä suunnitella korjauskohteet rakenteellinen paloturvallisuus huomioiden. Laskennallisessa tarkastelussa on huomioitava virhetarkastelu, sillä monet epävarmuustekijät saattavat vaikuttaa lopullisiin tuloksiin. Rakennusfysikaalinen mallinnus tehtiin yksinkertaistetulla mallilla, ja esimerkiksi wufin laskenta perustuu 2-dimensionaaliseen tarkasteluun, mikä on yksinkertaistus verrattuna todelliseen tilanteeseen nähden. Todellisuudessa sisäkuoren halkeamien tai ilmapuotokohtien määriä ei tiedetä ennen julkisivun

purkamista, mikä vaikeuttaa epätiiviiin sisäkuoren vaikutusten suuruuden tarkastelua. Ilmaääneneristävyyden laskennallisessa tarkastelussa halkeamien leveyden kasvaessa suureksi, viivamaisen raon ilmaääneneristävyyden laskentateoria ei enää päde ja virheen määrä tuloksissa kasvaa.

Kosteuden ja lämmön siirtymistarkasteluissa epätiivis sisäkuori ei vaikuta homeindeksi-arvoihin, koska homeindeksi oli lähellä nollaa jo tiiviillä julkisivurakenteilla. Kosteuden kondensoitumisessa tuulensuojalevyn sisäpintaan epätiivis sisäkuori sen sijaan vaikutti merkittävästi, sillä sisäkuoren halkeamien kautta konvektiolla kulkeutuva kosteusvirta oli moninkertainen verrattuna tiiviillä rakenteilla diffuusiolla kulkeutuvan kosteusvirtaan. Suhteellisen kosteuden arvot olivat liian korkeita jo pelkästään diffuusion kosteusvirran laskennalla, joten epätiiviiin sisäkuoren vaikutus kasvatti entisestään kosteuden riskiä kondensoitua rakenteeseen. Mahdolliset virhettä aiheuttavat tekijät huomioituna epätiivillä sisäkuorella ei ole vaikutusta julkisivurakenteen ilmaääneneristävyyssarvoihin, sillä rankareitin kautta kulkeutuva ääni määrittelee lopullisen ilmaääneneristävyyden.



## LÄHTEET

- [1] Finlex. Lainsäädäntö. Säädökset alkuperäisinä. 796/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä. Viitattu 23.5.2018. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>
- [2] Finlex. Lainsäädäntö. Säädökset alkuperäisinä. 848/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Viitattu 23.5.2018. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170848>
- [3] Mäkiö, E. Kerrostalot 1940-1960. Rakennustietosäätiö. Rakennuskirja Oy, Helsinki. 1989. 273 s.
- [4] Neuvonen, P. Kerrostalot 1880-2000 – arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen. Tammer-Paino, Tampere 2006. 288 s.
- [5] RIL255-1-2014 Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki 2014. 500 s.
- [6] Gomperts, M. & Kihlman, T. The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls. Acta Acustica united with Acustica 1967, volume 18, number 3, pp. 144-150.
- [7] Rindel, J. Sound Insulation in Buildings. CRC Press 2018. 450 s.
- [8] RIL K170-1995. Korjausrakentaminen V. Rakennusten julkisivu- ja ulkoseinä-rakenteiden korjaus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry. Helsinki 1995. 268 s.
- [9] RIL K72-1987 Tiili- ja harkkorakenteet tänään. Vanhojen tiilirakennusten korjaus. Valopaino Oy. Helsinki 1987. 224 s.
- [10] Kaivonen, J.-A. Rakennusten korjaustekniikka ja talous. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustieto Oy. Helsinki 1994.
- [11] RIL K170-1995. Korjausrakentaminen IV. Kattorakenteiden korjaus. Runkorakenteiden korjaus ja vahvistaminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry. Helsinki 1995. 327 s.
- [12] Haukijärvi, M., Hekkanen M., Lahdensivu, J. & Mattila, J. JUKO – Julkisivujen korjausopas 2009. Julkisivuyhdistys Ry. Helsinki. 101 s.

- [13] Pitkäranta, M. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöopas 2016. Helsinki 2016. 238 s. [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO\\_2016\\_Kuntotutkimusopas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimusopas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [14] Hagentoft, C.-E. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur AB. Lund, Sweden 2001. 422 s.
- [15] Laine, Markku. Ylä-Mattila, Reijo. Tiilirakenteet. Rakennuskirja Oy. Jyväskylä 1980
- [16] Tiili-info. Tiili materiaalina. Viitattu 3.4.2018. Saatavissa: <http://www.tiili-info.fi/tiili-materiaalina/?for=ammattilaiset>
- [17] Suomen Betoniyhdistys. BY46 Rappauskirja. Nykypaino Oy, Helsinki 2005. 158 s.
- [18] RIL K174-1. Korjausrakentaminen I. Yleiset perusteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry. Helsinki 1988. 325 s.
- [19] Julkisivuyhdistys. Muuratut julkisivut. Kuorimuurin purkaminen ja uudelleenrakentaminen. Viitattu 29.3.2018. Saatavissa: <http://www.julkisivuyhdistys.fi/julkisivi2/juko/muuratut.html>
- [20] Björkholtz, D. Lämpö ja kosteus, Rakennusfysiikka. Rakennustieto Oy. Helsinki 1997. 150 s.
- [21] Tiili-info. Tiili rappausalustana. Viitattu 3.4.2018. Saatavissa: <http://www.tiili-info.fi/suunnitteluohjeet/tiili-rappausalustana/?for=ammattilaiset>
- [22] Humble, O. Äldre murverkshus. Reparationer och ombyggnad. Ljunglöfs Offset AB. Stockholm 1990. 304 s.
- [23] Suomen Betoniyhdistys. BY64 Tuulettuvat julkisivut. Oy Fram Ab, Vaasa 2016. 121 s.
- [24] SFS-EN 13830:2015 Julkisivujärjestelmät. Tuotestandardi.
- [25] RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry. Saarijärven Offset Oy, 2015. 4. painos. 219 s.
- [26] Suomen Betoniyhdistys. BY57 Eriste- ja levyrappaus. ESA Print Oy, Lahti 2011. 158 s.
- [27] Suomen Betoniyhdistys. BY42 Betonijulkisivun kuntotutkimus. Multiprint Oy, Vantaa 2003. 163 s.

- [28] Julkisivuyhdistys. Betonijulkisivut. Verhouskorjaukset. <http://www.julkisivuyhdistys.fi/julkkari2/juko/betonijulkisivut.html>
- [29] Rakennustieto. Tietotuotteet. CAD-kirjastot. Ulkoseinärakenteita. RT US 410. Viitattu 13.8.2018. Saatavissa: [https://www-rakennustieto-fi.libproxy.tut.fi/index/tuotteet/kirjastot/kirjasto/204/Kirjasto\\_tuotteet/5979.html](https://www-rakennustieto-fi.libproxy.tut.fi/index/tuotteet/kirjastot/kirjasto/204/Kirjasto_tuotteet/5979.html)
- [30] Tiili-info. Tiilimuurin uusiminen. Viitattu 20.4.2018. Saatavissa: <http://www.tiili-info.fi/yllapito-ja-korjaus/tiilimuurin-uusiminen/>
- [31] Suomen Betoniyhdistys. BY41 Betonirakenteiden korjausohjeet. Painoyhtymä Oy, Porvoo 2007. 110 s.
- [32] RIL 243-1-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu. Akustiikan perusteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry. Hakapaino Oy, 2007. 224 s.
- [33] Rakennustuoteteollisuus Ry. Betonirakenteiden ääniteknikka. Lahden Kirjapaino ja Sanomalehti Oy. Lahti 2000. 79 s.
- [34] Siikanen, U. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Rakennustieto Oy. Tammer-Paino Oy. Helsinki 1996. 219 s.
- [35] Asuirakennusten ääniteknikan täydentävä suunnitteluohje. Rakennusteollisuus RT, Betonikeskus Ry. Viitattu 15.6.2018. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/aaneneristys/teoria>
- [36] Rakennusteollisuus. Asuinrakennusten ääniteknikan täydentävä suunnitteluohje. 2009. Viitattu 16.2.2018. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/aaneneristys/teoria>
- [37] Kylliäinen, M. Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos. Tampere 2006. 208 s.
- [38] SFS-EN ISO 717-1. Acoustics. Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements. Part 1: Aisborne Sound Insulation. 2013.
- [39] Hongisto, V. Levyrakenneseinän ilmaääneneristävyyden mallintaminen. Rakennusfysiikka 2007, Seminaarijulkaisu 1. Tampere 2007.
- [40] Eulerin vakio. Viitattu 16.7.2018. Saatavissa: <http://mathworld.wolfram.com/Euler-MascheroniConstant.html>
- [41] Rakennustuoteteollisuus RTT Oy. Uudet betonijulkisivurakenteet. Julkisivu 2000. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä 1998

- [42] Ympäristöministeriö. Rakennusten paloturvallisuus & Paloturvallisuus korjausrakentamisessa. Edita Prima Oy. Helsinki 2003. 166 s.
- [43] Rakenteiden lämpötekniikka. Lämmön siirtyminen. Viitattu 14.5.2018. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Rakenteiden-lampotekniikka>
- [44] Mills, A. F. Basic Heat and Mass Transfer. Second edition. Prentice Hall. United States of America 1999. 1000 s.
- [45] Björkholtz, D. Rakennuksen kuivattaminen. Suomen Rakennustuoteteollisuusliitto Ry. Tammer-Paino Oy. Tampere 1990. 76 s.
- [46] Kauppi, A., Rautiainen, L. & Saarimaa, J. Tiili- ja puuseinät: ongelmat, syyt, ratkaisut. Rakentajain kustannus Oy. Jyväskylä 1990. 47 s.
- [47] Sisäilmayhdistys. Terveelliset tilat. Kosteusvauriot. Kosteustekninen toiminta. Kosteuden siirtyminen. Viitattu 23.2.2018. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Kosteuden-siirtyminen>
- [48] Zumdahl, S. Chemistry, 5. painos. 2005. Houghton Mifflin Company, Boston. 1070 s.
- [49] SFS-EN ISO 13788. Hygrothermal performance of Building Components and Building Elements. Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation. Calculation Methods. 2013.
- [50] Pentti, M. & Hyypöläinen, T. Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Talonrakennustekniikka, julkaisu 94. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1999.
- [51] Ojanen, T. & Kohonen, R. Ilmavirtausten vaikutus rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Offsetpaino, Espoo 1989. 106 s.
- [52] Sisäilmayhdistys. Terveelliset tilat. Kosteusvauriot. Kosteustekninen toiminta. Ilman ominaisuudet. Viitattu 5.6.2018. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilman-ominaisuudet>
- [53] Sisäilmayhdistys. Terveelliset tilat. Kosteusvauriot. Kosteustekninen toiminta. Ilmavirtaukset rakennuksessa. Viitattu 5.6.2018. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>

- [54] RT 05-10710. Kosteus rakennuksissa. 1999.
- [55] Rakennusvaipan paloturvallisuus. Opas suunnittelijalle. Finnisol Ry, 2015. 28 s. Viitattu 5.8.2018. Saatavissa: <https://www.paroc.fi/-/media/files/campaigns/finnisol-opas-07052015.ashx?la=fi-fi>
- [56] Paroc, Palo- ja äänikirja. 66 s. Viitattu 5.8.2018. Saatavissa: <https://www.paroc.fi/kampanjat/paroc-palo-ja-aanikirja>
- [57] RIL 195-3-2000 Rakenteellinen paloturvallisuus. Korjausrakentaminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry. Yleisjäljennös Oy. Helsinki 2000. 160 s.
- [58] Puuinfo. Pintojen ja katteiden paloluokitukset. Viitattu 10.8.2018. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/pintojen-ja-katteiden-paloluokat.pdf>
- [59] Kirkpatrick, D., Hakim, D. & Glanz, J. Why Grenfell Tower Burned: Regulators Put Cost Before Safety. Viitattu 5.8.2018. Saatavissa: <https://www.nytimes.com/2017/06/24/world/europe/grenfell-tower-london-fire.html>