

Petri Ylitalo

RAKENNUKSEN PAINESUHTEIDEN HUOMIOINTI KORJAUSRAKENTAMISESSA

RAKENNUKSEN PAINESUHTEIDEN HUOMIOINTI KORJAUSRAKENTAMISESSA

Petri Ylitalo
Opinnäytetyö
Syksy 2023
Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulu-
tutkinto, talotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto, talotekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Petri Ylitalo

Opinnäytetyön nimi: Rakennuksen painesuhteiden huomiointi korjausrakentamisessa

Työn ohjaaja: Mika Syväniemi

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2023

Sivumäärä: 57 + 1 liite

Opinnäytetyössä selvitettiin, mitä tulisi huomioida korjaus- ja muutostyön suunnittelussa, jotta varmistettaisiin rakennuksen painesuhteiden hallittavuus. Työn toimeksiantajana oli Oulun rakennusvalvonta ja tavoitteena oli parantaa korjausrakentamisen suunnittelun yleistä laatua ja laatia suunnittelijoiden avuksi ohjekortti rakennusvalvonnan internet-sivuille. Valmista korttia työn yhteydessä ei saatu laadittua, mutta kortin tietosisältö saatiin koostettua.

Työn tietosisältö kerättiin kirjallisuuslähteistä sekä sähköpostihaastatteluilla. Tietoperusta koostuu ilmiöön liittyvistä rakennusfysiikan aiheista, kuten ilmanpaineen käyttäytymisestä, ilman epäpuhtauksista sekä vesihöyryn käyttäytymisestä ilmassa. Näiden lisäksi tietoperustassa käsitellään rakenteiden ilmatiiveyttä ja kosteusteknistä toimintaa sekä erilaisten ilmanvaihtojärjestelmien toimintaa. Eri lähteiden tietoja yhdistettiin ja sidottiin käytännön suunnittelutapauksiin siten, että korjausrakentamista suunnittelevan olisi helppo saada käsitys siitä, mitä asioita tulee ottaa huomioon.

Työn tuloksena huomattiin, että rakennuksen painesuhteet ovat todella monimutkainen kokonaisuus, johon vaikuttavat niin rakennuksen ominaisuudet, rakennuksen käyttö kuin ympäröivät olosuhteetkin. Paine-eroja ei pystytä eliminoimaan, joten suunnittelussa tuleekin kiinnittää huomiota niiden haittojen minimointiin sekä käytettyjen ratkaisujen vikasietoisuuteen. Paineolosuhteiden seuranta jatkuvin mittauksin mahdollistaa toiminnan jatkuvan seurannan ja vikatilanteisiin reagoimisen.

Rakenteiden kannalta kaikkein tärkein asia painesuhteiden hallinnassa on rakenteiden ilmatiiveys. Huono ilmatiiveys mahdollistaa ilmavuodot rakennuksen läpi, joka lisää termisen paine-eron suuruutta. Ulkovaipan huono ilmatiiveys lisää sekä tuulen ja ilmanvaihdon aiheuttamien paine-erojen aiheuttamia vuotoilmavirtoja.

Ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelulla ja oikealla säädöllä on valtava merkitys rakennuksen painesuhteisiin. Korvaus- ja siirtoilmareittien oikea mitoitus on tärkeää, jotta ilma kulkisi turvallisia reittejä pitkin. Koneellisessa tulo-poistojärjestelmässä on tärkeää kiinnittää huomiota sekä kokonaisilmamäärän tasapainoisuuteen että siihen, mihin tiloihin tuloilma johdetaan ja johtaako se huonekoh-taiseen ylipaineeseen.

Jatkokehityksen tarvetta huomattiin siinä, että rakennusten käyttöön täytyisi saada ohjeistusta. Hyvinkään suunniteltu ja toteutettu rakennus pysy itsestään toimivana, vaan se vaatii asiantuntevaa huoltoa, hoitoa ja tarkkailua.

Asiasanat: ilmanvaihto, paine-ero, korvausilma, ulkoilma, hormivaikutus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Master's Degree Programme in Building Services

Author: Petri Ylitalo

Title of thesis: Managing building pressure conditions in renovation construction

Supervisor: Mika Syväniemi

Term and year when the thesis was submitted: autumn 2023

Number of pages: 57 + 1 appendix

The goal of the thesis was to investigate what should be considered in the planning of renovation to ensure the manageability of building pressure conditions. The employer of this thesis was Oulu Building Control, and the goal was to create a guideline about the subject for their website. While the final guide was not completed during the work, the actual content of the information for the guide was compiled.

The information for the thesis was gathered from literature sources and through email interviews. The theoretical basis consists of topics related to building physics phenomena, such as the behavior of air pressure, air impurities, and the behavior of water vapor in the air. In addition, the theoretical basis addresses the air tightness and moisture technical performance of structures, as well as the operation of various ventilation systems. Information from various sources was combined and tied to practical design cases so that those planning renovation construction could easily understand what aspects need to be considered.

As a result of the work, it was noted that building pressure conditions are a highly complex entity influenced by building characteristics, building usage, and surrounding conditions. Pressure differences cannot be eliminated, so in the design, attention should be paid to minimizing their disadvantages and keeping the used solutions as fault tolerating as possible. Continuous monitoring of pressure conditions after renovations is recommended.

For structures, the most crucial factor in pressure condition management is the air tightness of the structures. Poor air tightness allows air leakage through the building, increasing the magnitude of stack effect, wind, and the pressure difference caused by ventilation.

The design and proper adjustment of the ventilation system play a significant role in building pressure conditions. Correct dimensioning of make-up and transfer air routes is essential to ensure that air travels through safe routes. In a supply air ventilation system, it is important to pay attention to both the overall air mass balance and to where the supply air is directed, ensuring it does not lead to room-specific overpressure.

Keywords: ventilation, pressure difference, make-up air, outdoor air, stack effect

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Opinnäytetyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	8
1.2	Tutkimuksellinen kehittämistyö ja konstrukttiivinen tutkimus	9
2	RAKENNUKSEN PAINESUHTEIDEN VAIHTELUN SYYT JA SEURAUKSET	12
2.1	Lainsäädäntö.....	12
2.1.1	Maankäyttö- ja rakennuslaki	12
2.1.2	Ympäristöministeriön asetukset	12
2.2	Sisäilmaongelmat Suomessa	13
2.3	Sisäilman epäpuhtaudet.....	14
2.3.1	Mikrobit	14
2.3.2	Hiukkasmaiset epäpuhtaudet.....	15
2.3.3	Kemialliset yhdisteet	16
2.3.4	Radon	17
2.4	Ilmankosteus	19
2.4.1	Vesihöyry	19
2.4.2	Konvektio	21
2.4.3	Diffuusio.....	21
2.5	Rakennuksen vaipan tiiveys.....	22
2.6	Rakennuksen vaipan yli muodostuva paine-ero	24
2.6.1	Ilmanvaihdon vaikutus	25
2.6.2	Terminen paine-ero.....	25
2.6.3	Tuuli.....	30
2.7	Rakennuksen ulkovaipan rakenteet	32
2.7.1	Höyrynsulku ja ilmansulku.....	32
2.7.2	Rakenteiden kosteustekninen toiminta.....	33
2.8	Ilmanvaihtojärjestelmät.....	33
2.8.1	Ilmanvaihtojärjestelmien tyypit	33
2.8.2	Suodattimet.....	35
2.8.3	Ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen	35
3	PAINESUHTEIDEN HALLINTA	37
3.1	Keinojen löytäminen	37

3.2	Henkilöhaastattelut.....	37
3.2.1	Haastattelujen toteuttaminen ja tarkoitus	37
3.2.2	Haastateltavien henkilöiden valinta.....	38
3.2.3	Haastattelukysymykset	38
3.2.4	Haastattelujen tulokset.....	38
3.3	Ilmanvaihtoratkaisut paine-erojen hallintaan	39
3.3.1	Painovoimainen ilmanvaihto	39
3.3.2	Koneellinen poistoilmanvaihto.....	40
3.3.3	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto	41
3.3.4	Ilmanvaihdon suodattimien vaikutus	42
3.3.5	Hormivaikutuksen huomiointi	43
3.4	Rakenneratkaisut	45
3.4.1	Eristemateriaalit	45
3.4.2	Rakennuksen vaipan tiivistäminen.....	45
3.5	Mittaukset.....	46
4	OHJEKORTIN SISÄLLÖN SUUNNITTELU	47
4.1	Kortin tarkoitus ja muoto.....	47
4.2	Suunnittelun periaatteet.....	47
4.3	Lähtötilanteen tunnistaminen ja tavoitteiden asettaminen	48
4.4	Muutosten vaikutus	52
5	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	53
5.1	Hankkeet, joissa paine-erot tulee huomioida.....	53
5.2	Keinot painesuhteiden hallintaan.....	53
5.3	Painesuhteiden huomiointi korjausrakentamisen suunnittelussa.....	54
6	POHDINTA	56
	LÄHTEET.....	58
	LIITTEET	64

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on rakennuksen painesuhteiden huomiointi korjausrakentamisessa. Kun kahta tilaa erottaa jokin rakenne ja niiden sisäinen painetaso on eri, on tilojen välillä paine-ero, joka pyrkii tasoittumaan. Paine-ero liikuttaa ilmaa ja sen mukana mahdollisia epäpuhtauksia ja kosteutta rakenteiden vuotopaikkojen läpi. Tällä on suora vaikutus rakennusten turvallisuuteen ja terveellisyteen.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Oulun kaupungin rakennusvalvonta. Rakennusvalvonta on kunnan viranomaisorganisaatio, jonka tehtävänä on muun muassa rakennetun ympäristön valvonta, rakentamisen lupien käsittely sekä rakentamiseen liittyvä neuvonta ja ohjaus. Rakennusvalvontaviranomaisen on aina monijäseninen lautakunta tai muu toimielin (MRL 21 §). Oulussa rakennusvalvontaviranomaisena toimii rakennuslautakunta, ja sen tehtäviä ja toimivaltaa on delegoitu johtosäännöllä eteenpäin useille viranhaltijoille, jotka hoitavat omaa osa-alueitaan (Oulun kaupungin hallintosääntö 19 §; Oulun rakennusvalvontatoimen jatkodelegointi).

Opinnäytetyön aihe on merkittävä, sillä ohjekorttia voi hyödyntää kuka tahansa rakennuksen korjausta miettivä, ja aihe koskee joissain määrin koko Suomen rakennuskantaa. Mikäli yksikin rakennus säästyy ohjeen ansiosta ehyenä ja välttää ennenaikaisen purkamisen tai yhdenkin ihmisen terveys pysyy sen vuoksi parempana, on työn tekeminen kannattavaa.

Jotta haittoja voitaisiin estää, tulisi tehdä kaksi asiaa: minimoida paine-erot niin hyvin kuin mahdollista sekä varmistaa, ettei paine-eroista aiheudu haittaa siltä osin kuin niitä ei voida välttää. Näiden saavuttamiseksi tulee ymmärtää, mitkä asiat vaikuttavat ilmiön syntyyn. Sen lisäksi tulee tietää, mitä keinoja painesuhteiden hallintaan on.

Opinnäytetyössä on välttämätöntä käsitellä myös vesihöyryn käyttäytymistä ilmassa ja rakenteissa. Ilmanpaine-erot rakennuksen eri osien välillä voivat aiheuttaa ilmavirtojen liikkumista rakenteiden läpi. Kun ilma liikkuu, se voi kuljettaa mukanaan vesihöyryä. Kun vesihöyry pääsee rakenteisiin, se voi tiivistyä vedeksi kylmissä kohdissa ja aiheuttaa kosteusvaurioita. Siksi on tärkeää ymmärtää, miten paine-erot vaikuttavat vesihöyryn liikkumiseen rakennuksessa, jotta voidaan ehkäistä kosteusvaurioita ja niiden aiheuttamia terveysongelmia.

Aihe on tässä työssä rajattu käsittelemään korjausrakentamista. Uudisrakentamista ohjaavat lait ja asetukset, joissa pyritään pieniin paine-eroihin ja tiiviiseen ja turvalliseen rakentamiseen. Myös ilmanvaihtojärjestelmä on uudiskohteissa lähes poikkeuksetta tasapainoon suunniteltava tulo- ja poistojärjestelmä. Korjaushankkeissa tilanne voi olla aivan erilainen, sillä rakennusten tiiveys voi olla hyvinkin heikko ja ilmanvaihtona voi toimia koneellinen poistoilmanvaihto, jonka korvausilma-reittinä toimii ikkunan tiivisteessä oleva rako.

1.1 Opinnäytetyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on löytää rakennusten korjaustöiden suunnittelijoiden avuksi keinoja haitallisten paine-erojen hallintaan. Opinnäytetyöhön on koottu tietoa erilaisten ilmanvaihtoratkaisujen, tuuliolojen ja termisen paine-eron vaikutuksesta rakennuksen painesuhteisiin. Työhön on kerätty myös tietoa erilaisista riskitekijöistä, joita paine-erot ja niiden aiheuttamat ilmavuodot voivat aiheuttaa.

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää korjausrakentamisen suunnittelutyön yleistä laatua ja parantaa suunnittelijoiden tietoisuutta aiheesta. Työn yhteydessä pyritään laatimaan opastava ohjekortti Oulun rakennusvalvonnan internet-sivuilla julkaistavaksi.

Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisessa korjaushankkeessa paine-erot tulee huomioida?
2. Mitä keinoja rakennuksen painesuhteiden hallintaan on?
3. Mitä rakennuksen korjauksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon, jotta paine-eroista ei aiheutuisi ongelmia rakennukselle tai sen käyttäjille?

Kysymyksiin etsitään vastauksia perehtymällä kirjallisuuteen sekä haastatteleamalla alan asiantuntijoita.

1.2 Tutkimuksellinen kehittämistyö ja konstruktioivinen tutkimus

Ylemmän ammattikorkeakoulun opinnäytetyö on luonteeltaan tutkimuksellinen kehittämistyö (Su-
vanto 2014, 13). Valtioneuvoston asetuksen ammattikorkeakouluista annetun valtioneuvoston ase-
tuksen muuttamisesta 423/2005 7 a § määrää ylemmän ammattikorkeakoulun opinnäytetyöstä
seuraavasti:

Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyön tavoitteena on kehittää ja osoittaa
kykyä soveltaa tutkimustietoa ja käyttää valittuja menetelmiä työelämän ongelmien eritte-
lyyn ja ratkaisemiseen sekä valmiutta itsenäiseen vaativaan asiantuntijatyöhön

Tutkimuksellinen kehittämistyö asettuu luonteeltaan tieteellisen tutkimuksen ja arkiajatteluun pe-
rustuvan kehittämistyön välimaastoon. Siinä pyritään kehittämään uusia toimintatapoja tai ratkai-
suja ongelmiin hyödyntäen tietoa sekä käytännöstä että teoriasta. Sekä päämäärä että keinot poik-
keavat tieteellisen tutkimuksen tekemisestä. Tutkimuksellisessa kehittämistyössä hyödynnetään
tieteellisen tutkimuksen maailmasta erilaisia tiedonkeruumenetelmiä sekä tapaa edistää työtä jär-
jestelmällisesti, analyttisesti ja kriittisesti. (Ojasalo ym. 2015, 17–21.)

Tutkimuksellinen kehittämistyö on prosessi, johon kuuluu työn suunnitteluvaihe, toteutusvaihe sekä
lopputuloksen arviointivaihe. Opinnäytetyö voi olla osa suurempaa kehittämistyötä ja toimia siinä
jonkin vaiheen tukena, mutta se sisältää silti samat prosessin osaset omassa lokerossaan. Ku-
vassa 1 on esitetty kehittämistyön prosessin kulku. (Ojasalo, Moilanen & Ritalahti 2015, 22-24.)



KUVA 1. Tutkimuksellisen kehittämistyön prosessi (Katri Ojasalo ym. 2015, 24).

Tämän opinnäytetyö tähtää suunnittelun laadun kehittämiseen. Pyrkimyksenä on laatia rakennusvalvonnan käyttöön ohjekortti, joka pohjautuu sekä kirjoitettuun tietoon että tämän työn yhteydessä kerättävään hiljaiseen tietoon. Työn kirjallisuuslähteinä käytetään alan kansainvälistä kirjallisuutta sekä aiheesta tehtyjä tutkimuksia, lopputöitä ja artikkeleita. Kuvan 1 prosessikaavio soveltuu hyvin noudatettavaksi tässä työssä, ja työ on oma kokonaisuutensa. Ohjekortin käytännön toimivuutta ja vaikuttavuutta voidaan tässä työssä tosin vain arvioida ennalta, sillä sen julkaisu jää opinnäytetyön valmistumisen jälkeiseen aikaan.

Kuvan 1 mukaisesti kehittämistyön yhtenä vaiheena on lähestymistavan valinta. Koska tässä työssä ollaan laatimassa uutta konkreettista ohjetta olemassa olevan tiedon pohjalta, soveltuu lähestymistavaksi konstruktiiivinen tutkimus. Konstruktiiivisessa tutkimuksessa on tärkeää perustaa tuotos aiempaan teoretiseen tietoon ja lisätä siihen uutta empiiristä tietoa. Pyrkimyksenä on näiden perusteella luoda uutta tietoa. On myös oleellista arvioida tuotetun ratkaisun toimivuutta ja hyödyllisyyttä. Jotta olisi mahdollista tuottaa uutta hyödyllistä tietoa, tulee sekä taustalla oleva teoria että käyttäjien, tässä tapauksessa rakennushankkeeseen ryhtyvien, tarpeet tuntea hyvin. (Ojasalo ym. 2015, 37-38 ja 65.)

Työn tietoperustana käytetään alan kansainvälistä kirjallisuutta. Sen lisäksi tutustutaan aiheesta tehtyihin tutkimuksiin, lopputöihin ja artikkeleihin. Tietoa kerätään myös erinäisistä standardeista, ohjekorteista ja määräyksistä. Lisäksi halutaan hyödyntää alan ammattilaisten hiljaista tietoa.

Koska työ perustuu olemassa olevan tiedon keräämiseen ja sen pohjalta uuden ohjeen luomiseen, lähestymistavaksi valikoitui konstruktiiivinen tutkimus. Ammattilaisten hiljaisen tiedon keräämiseksi hyödynnetään menetelmänä sähköpostihaastattelua.

2 RAKENNUKSEN PAINESUHTEIDEN VAIHTELUN SYYT JA SEURAUKSET

2.1 Lainsäädäntö

2.1.1 Maankäyttö- ja rakennuslaki

Rakentamista ja rakennusten ylläpitoa koskeva lainsäädäntö pohjautuu Suomessa Maankäyttö- ja rakennuslakiin. Rakennuksille on asetettu olennaiset tekniset vaatimukset, jotka rakennettavan tai korjattavan rakennuksen tulee täyttää (MRL 117 §). Rakennus tulee myös pitää jatkuvasti siinä kunnossa, että se täyttää terveellisuuden, turvallisuuden ja käyttökelpoisuuden vaatimukset (MRL 166 §).

Maankäyttö- ja rakennuslaki määrää, että rakennus tulee suunnitella ja rakentaa siten, että se on terveellinen ja turvallinen mm. sisäilmaltaan, kosteusolosuhteiltaan ja lämpöolosuhteiltaan. Rakennusta korjattaessa tai muuttaessa rakennuksen ominaisuudet ja erityispiirteet tulee ottaa huomioon, eikä rakennuksen käyttäjien turvallisuus tai terveydelliset olot saa heikentyä. (MRL 117 §.)

Ympäristöministeriölle on annettu valtuus antaa asetuksia, joilla voidaan säätää yksityiskohtaisempia vaatimuksia näihin pykäliin liittyen. Aiemmin määräykset olivat hyvinkin yksityiskohtaisia, mutta vuoden 2018 vaihteessa vanhat kirjaintunnuksin nimetyt rakentamismääräyskokoelmat siirtyivät pois voimasta ja niiden tilalle tuli uudet, suurpiirteisemmät Ympäristöministeriön asetukset.

2.1.2 Ympäristöministeriön asetukset

Ympäristöministeriön asetuksen rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 782/2017 mukaan rakennus tulee suunnitella ja rakentaa siten, ettei vesihöyry saa haittaa aiheutuen kulkeutua rakenteisiin (YM 782/2017 5 ja 6 §).

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017 määrää, että rakennuksen ulko- ja ulospuhallusilmavirrat on suunniteltava siten, ettei rakenteisiin aiheudu ylipaineen vuoksi rakenteita vaurioittavaa pitkäaikaista kosteusrasitusta eikä alipaineen

vuoksi epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan (YM 1009/2017 21 §). Asetus ei koske korjausrakentamista, mutta sama vaatimus on sinänsä sisäänrakennettuna maankäyttö- ja rakennuslakiin ja sen vaatimukseen pitää rakennukset terveellisinä ja turvallisina.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista määrää, että ilmanvaihdon ulkoilmavirran tulee olla rakennuksen käytön mukaisesti riittävä ja sen laadun tulee olla riittävän puhdasta (STM 545/2015 8 §). Asetuksen soveltamisohjeen mukaan ilman laadun puhtauden vuoksi tulee varmistua siitä, ettei rakenteista kulkeudu epäpuhtauksia huoneilmaan ilmajvirtausten mukana. Soveltamisohjeessa otetaan kantaa myös rakennuksen painetasoon ulkoilmaan nähden. Mikäli todetaan sisätilojen olevan ylipaineisia, tulee syy selvittää ja ilmanvaihto tasapainottaa. Alipaineen kanssa tilanne on sama, mikäli alipaineisuus on yli 15 Pa. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje 2016, 17-18.)

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä määrää ottamaan ulkovaipan tiivistyksen huomioon, jotta lämmöneristekerrokset suojaetaan ilmajvirtausten eristyskykyä heikentäviltä vaikutuksilta, ja että rakenteiden oikea toimivuus varmistetaan (YM 4/13 10 §).

2.2 Sisäilmaongelmat Suomessa

Erilaiset sisäilmaongelmat ovat Suomessa yleisiä. Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen Finterveys 2017 -tutkimuksen mukaan 37 % naisista ja 21 % miehistä oli kokenut saareensa oireita sisäilmasta jossain vaiheessa elämäänsä. Ongelmat ovat yleisempiä työpaikoilla kuin kodeissa. (Salmela ym. 2019, 53.)

Rakennuksissa, joissa esiintyy merkittäviä kosteusvaurioita, asuu vuonna 2012 julkaistun tutkimuksen mukaan 324 000...597 000 suomalaista. Pientaloissa ja rivitaloissa vaurioita on arvion mukaan 7-10 prosentissa rakennuksista, kerrostaloissa 6-9 prosentissa ja hoitolaitoksissa 20-26 prosentissa. Toimistoissa vaurioituneiden rakennusten osuus on 2,5...5 %. Tutkimuksessa merkittäviksi kosteusvaurioiksi laskettiin sellaiset vauriot, joista on suoraa terveydellistä vaaraa ihmiselle. (Reijula ym. 2012, 9.) Kosteusvauriot mahdollistavat mikrobien kasvun rakenteissa. Mikrobit ja niiden aineenvaihduntatuotteet aiheuttavat ihmisten oireilua päätyessään huoneilmaan.

Tarkempaa tutkimusta siitä, minkä verran rakennusten epäedulliset ilmanpainesuhteet aiheuttavat vaurioita tai sisäilmaongelmia ei ole. Kun huomioidaan, kuinka herkästi rakennukseen muodostuu haitallisia paine-eroja ja kuinka yksinkertaisella mekanismilla se voi aiheuttaa kosteusvaurioita, voidaan arvioida kyseessä olevan merkittävä määrä.

2.3 Sisäilman epäpuhtaudet

2.3.1 Mikrobit

Mikrobit eli mikro-organismit ovat mikroskooppisen pieniä eliöitä, jotka muodostavat olennaisen osan biosfääriämme. Ne ovat niin pieniä, ettei niitä voi nähdä paljain silmin. Niiden kokoluokka on 1-100 mikrometriä, ja ne ovat kaikkialla ympärillämme: maaperässä, vesistöissä, ilmassa ja jopa eläimissä ja ihmisissä. Käytännössä kaikissa rakennuksissa on myös mikrobeja. Mikrobeihin kuuluu laaja kirjo organismityypejä, mukaan lukien bakteerit, virukset, homesienet, alkueläimet ja arkit. Mikrobit ovat elintärkeitä monissa ekologisissa prosesseissa, kuten ravinteiden kierrossa ja orgaanisen aineen hajoamisessa. Lisäksi ne ovat tärkeitä teollisissa prosesseissa, kuten fermentoinnissa, sekä lääketieteellisissä sovelluksissa, kuten antibioottien ja probioottien kehittämisessä. On kuitenkin huomattava, että kaikki mikrobit eivät ole hyödyllisiä, vaan jotkut voivat aiheuttaa sairauksia tai olla haitallisia ympäristölle. (Madigan ym. 2015, 6-12.)

Rakennusten sisäilmassa tavattavat mikrobit ovat peräisin joko ihmisestä, ulkoilmasta, lemmikeistä, tavaroista taikka rakennuksesta. Suurin bakteerien lähde sisäilmassa on ihminen itse. Sieni-itiöiden kulkeutuminen huoneilmaan on riippuvainen ilmanvaihtojärjestelmästä. Pitoisuus on alin koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon tapauksessa, sillä tuloilma suodatetaan eikä ilmapuotoja rakenteista ole niin paljoa. (Hometalkoot.fi 2023)

Mikrobien aineenvaihdunnan tuotteena syntyy niin sanottuja mikrobi-VOC-yhdisteitä (microbial volatile organic compounds). Ne ovat kaasumaisia epäpuhtauksia, esimerkiksi alkoholeja, aldehydejä, ketoneja tai orgaanisia happoja. Näitä samoja yhdisteitä voi haihtua myös muista lähteistä, kuten rakennusmateriaaleista, pesuaineista tai elintarvikkeista. Mikrobi-VOC-yhdisteillä ja hengitystieoireilla on todettu yhteys. (Hometalkoot.fi 2023)

Rakennusterveyden kannalta oleellinen mikrobin alalaji, eli homesienet vaativat kasvaakseen so-
 pivat olosuhteet. Homeetta alkaa syntyä rakennusaineen pintaan, kun ilman suhteellinen kosteus
 rakenteen pinnalla on vähintään 75 % ja lämpötila +3...45°C. Homehtumisherkkyys on myös riip-
 puvainen potentiaalisesta kasvupohjasta ja sen pintakäsittelystä (kuva 2). Home voi vahingoittaa
 rakennusmateriaaleja, aiheuttaa epämiellyttäviä hajuja ja pahimmillaan vaikuttaa sisäilman laatuun
 heikentävästi ja aiheuttaa terveyshaittoja. Homeitiöt voivat aiheuttaa allergioita, ärsyttää hengitys-
 teitä ja jopa laukaista astmakohtauksia tai homepölykeuhkosairauden. (Björkholtz 1987, 61; Siika-
 nen 1996, 182-184; Hometalkoot 2023.)

Homehtumisherkkyysluokka		Esimerkkejä rakennusmateriaaleista
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitallistettu sahatavara, höylätty mänty, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy, kartonkipintainen kipsilevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset bitumoidut/käsitellyt tuotteet ja kalvot, puupohjaiset liimatut levyt, havu- neri, bitumoitu/käsitelty huokoinen kuitulevy, lasikuitu- pintainen kipsilevy
HHL3	Kohtalaisen herkkä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, se- menttipohjaiset tuotteet, tiilet, kuitusementtilevy, lasi- kuitupintainen kipsilevy
HHL4	Kestävä	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita ho- mesuoja-aineita sisältävät materiaalit

KUVA 2. Eri rakennusmateriaaleja jaoteltuina niiden homehtumisherkkyden mukaan (Ympäristö-
 ministeriö 2023, 11).

2.3.2 Hiukkasmaiset epäpuhtaudet

Huoneilman hiukkasmaisia epäpuhtauksia ovat esimerkiksi pöly, itiöt, kuidut (kuten asbesti tai mi-
 neraalivillakuidut), hiukkaspäästöt liikenteestä ja teollisuudesta sekä mikrobit. Hiukkaset voivat olla
 eri kokoisia, jolloin niiden vaikutukset terveyteen vaihtelevat. Hiukkasten kokoluokitus perustuu ni-
 den aerodynaamiseen halkaisijaan. Yleisesti käytetyt luokat ovat PM10, PM2.5 ja PM1.

PM10 tarkoittaa hiukkasia, joiden aerodynaamisen halkaisijan maksimikoko on 10 mikrometriä.
 Tämä kategoria sisältää sekä hengitettävät karkeat että hienot hiukkaset, jotka pääsääntöisesti

jäävät ylähengitysteihin. Keuhkoihin asti pääsevät hiukkaset ovat kooltaan alle 5 mikrometriä. Tällaisia ovat esimerkiksi mineraalivillakuidut.

PM2.5 tarkoittaa hiukkasia, joiden halkaisija on enintään 2,5 mikrometriä. Nämä hiukkaset voivat kulkeutua syvemmälle hengityselimistöön ja jopa päästä verenkiertoon. Tähän luokkaan kuuluvat suuremmat itiöt sekä orgaaniset hiukkaset.

PM1 tarkoittaa vielä pienempiä hiukkasia, joiden aerodynaaminen halkaisija on enintään 1 mikrometri. PM1-hiukkaset voivat tunkeutua erityisen syvälle keuhkorakkuloihin ja ovat näin ollen suurimman terveysriskin aiheuttajia. Tähän pienimpien hiukkasten ryhmään kuuluvat esimerkiksi palamishiukkaset, bakteerit ja pienimmät itiöt. (Camfil Oy 2023; Sisäilmayhdistys 2023; THL 2023)

2.3.3 Kemialliset yhdisteet

Sisäilmassa esiintyvät kemialliset yhdisteet voivat olla peräisin rakennuksen ulkopuolelta, rakennusmateriaaleista tai rakennuksessa käytetyistä kemikaaleista. Ne ovat kaasumaisia tai hiukkasmaisia aineita, ja ne voivat olla orgaanisia tai epäorgaanisia. Epäorgaanisia yhdisteitä ovat esimerkiksi ammoniakki, otsoni ja rikkiyhdisteet. Orgaanisia yhdisteitä on satoja, ja yleensä kuvataankin vain niiden kokonaismäärää määreellä VOC (volatile organic compounds), eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet. Tällaisia ovat esimerkiksi formaldehydi ja hiilivedyt (Kähkönen & Saarinen 1996; Siikanen 1996, 185; Sisäilmayhdistys 2023)

Rakennusmateriaaleista haihtuvat VOC-yhdisteet ovat korkeimmillaan silloin kun materiaali on uutta. Tästä syystä vasta valmistuneen rakennuksen VOC-päästöt ovat korkeat, mutta ne normalisoituvat noin vuodessa, vähentyen noin 70 prosenttia rakennushetkisestä tilanteesta. Kymmenen vuoden käytön jälkeen VOC-pitoisuudet laskevat tästä vielä kymmenesosaan. Näitä materiaalien lyhytaikaisia ominaispäästöjä kutsutaan primääriemissioiksi. Sisäilman kannalta merkittävimpiä päästöjä ovat sekundääriemissiot, eli materiaalien pidempiaikaiset ominaispäästöt. (THL Työpaperi 5/2022, 10; Sisäilmayhdistys 2023)

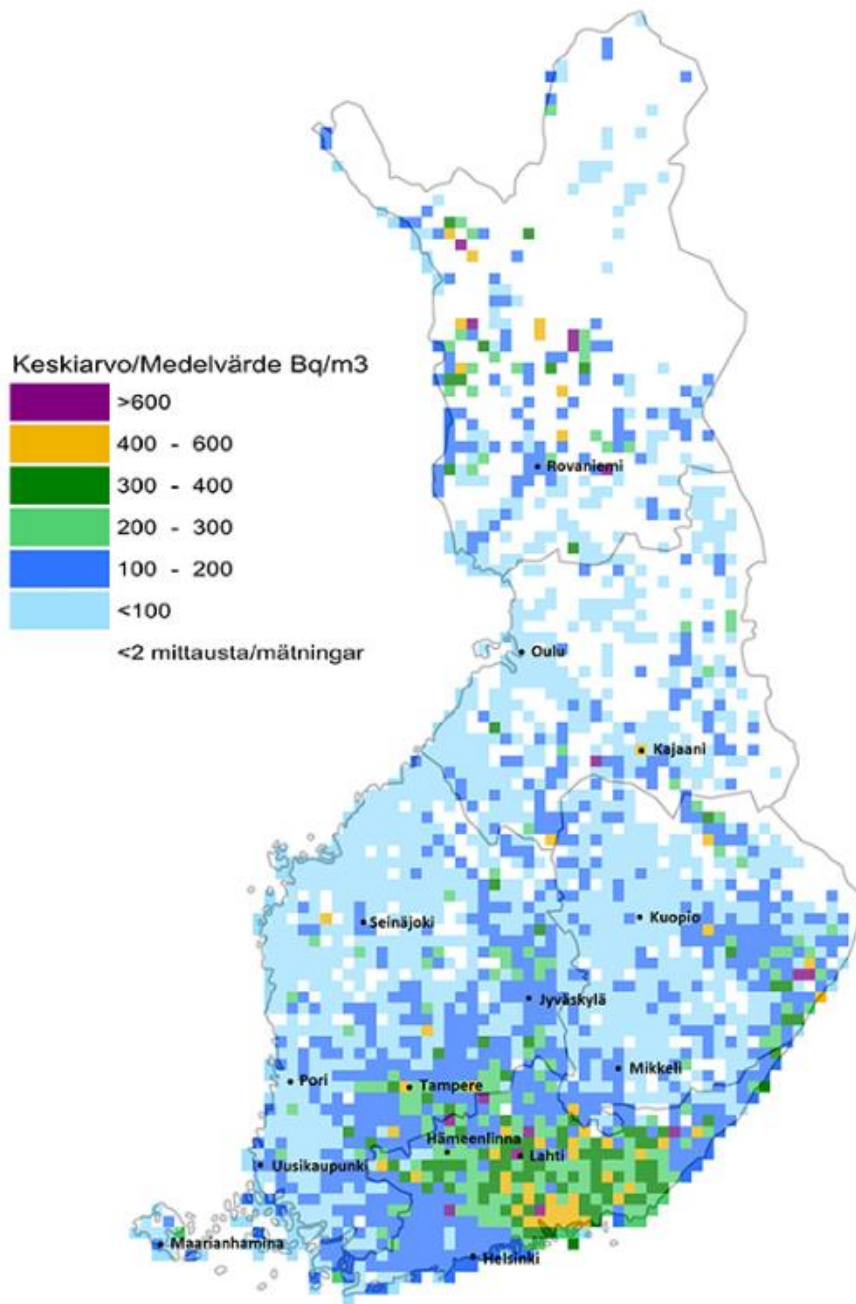
Kemialliset yhdisteet aiheuttavat monenlaisia oireita, joista osa on nopeasti ohi meneviä altistumisen päätyttyä. Tällaisia lyhytkestoisia oireita ovat limakalvojen ärsytys sekä päänsärky. Pitkäkestoisempiakin haittoja kuitenkin esiintyy. On mahdollista, että VOC-yhdisteet lisäävät astmariskiä, ja

formaldehydi voi aiheuttaa jopa syöpää. (Työterveyslaitos 2021, 63; THL Työpäpöri 5/2022, 26; Hengitysliitto 2023)

2.3.4 Radon

Radon on radioaktiivinen kaasu, jota syntyy hajoamistuotteena uraanista useiden hajoamisten jälkeen. Koska radon on näkymätöntä ja hajutonta, sitä ei voi havaita muutoin kuin mittaamalla. Pitkäaikainen altistuminen radonille aiheuttaa keuhkosyöpää. Suomessa siihen sairastuu vuosittain radonin vuoksi arviolta 150–270 henkilöä. (Säteilyturvakeskus 2023.) Radon on ilmaa kevyempi kaasu (tiheys 0,97 kg/m³), joten se nousee maaperästä ylöspäin ja pääsee rakennuksiin ilmavuotojen mukana (Rakennustieto Oy 2019, RT 103123, 2; Työterveyslaitoksen kemikaalikortti 2023.)

Uuden rakennuksen huoneilman radonpitoisuudelle on asetettu lainsäädännössä yläraja, joka on 200 Bq/m³. Vanhoissa rakennuksissa asunnon tai muun oleskelutilan viitearvo pitoisuudelle on 300 Bq/m³. (STMA 1044/2018 20 §.) Suomessa huoneilman keskimääräinen radonpitoisuus on 94 Bq/m³, mutta vaihtelu rakennusten välillä on suurta (Säteilyturvakeskus 2023). Kuvassa 3 on esitetty mittausdataan perustuvia huoneilman radonpitoisuuksia eri puolilla Suomea.



KUVA 3. Huoneilman radonpitoisuuksia eri puolilla Suomea (STUK radonkartat 2017.)

2.4 Ilmankosteus

2.4.1 Vesihöyry

Ilmankosteus johtuu ilmaan sekoittuneesta vesihöyrystä. Vesihöyry on kevyempää kuin kuiva ilma, eli mitä kosteampaa ilma on, sitä kevyempää se on. Tietyssä lämpötilassa oleva ilma voi sisältää vain tietyn määrän vesihöyryä. Mitä suurempi lämpötila on, sitä enemmän vesihöyryä ilma voi sisältää. Kuvassa 4 on esitetty vesimäärän maksimimääriä, eli kyllästyskosteuksia ilman eri lämpötiloille. Kyllästyskosteuden ja lämpötilan välillä ei ole täsmällistä matemaattista yhteyttä. (Björkholtz 1987, 44-45.)

t °C	v _k g/m ³	p _k Pa	t °C	v _k g/m ³	p _k Pa	t °C	v _k g/m ³	p _k Pa
-20	0,87	102	14	12,10	1602	48	75,67	11207
-19	0,95	111	15	12,86	1708	49	79,33	11786
-18	1,04	122	16	13,65	1820	50	83,14	12390
-17	1,14	135	17	14,49	1939	51	87,10	13020
-16	1,25	149	18	15,37	2064	52	91,21	13677
-15	1,38	164	19	16,30	2197	53	95,48	14362
-14	1,52	181	20	17,28	2337	54	99,92	15075
-13	1,67	200	21	18,31	2484	55	104,5	15818
-12	1,83	221	22	19,40	2640	56	109,3	16592
-11	2,01	242	23	20,54	2805	57	114,2	17397
-10	2,20	266	24	21,74	2979	58	119,4	18234
-9	2,40	292	25	23,00	3162	59	124,7	19105
-8	2,61	319	26	24,32	3355	60	130,2	20010
-7	2,84	348	27	25,71	3559	61	135,9	20951
-6	3,08	379	28	27,17	3773	62	141,9	21928
-5	3,33	412	29	28,70	3999	63	143,0	22943
-4	3,60	447	30	30,31	4237	64	154,3	23997
-3	3,89	485	31	31,99	4487	65	160,9	25090
-2	4,19	524	32	33,75	4750	66	167,7	26224
-1	4,51	566	33	35,60	5027	67	174,7	27401
0	4,85	611	34	37,54	5317	68	181,9	28620
1	5,21	658	35	39,56	5622	69	189,4	29884
2	5,58	708	36	41,68	5940	70	197,1	31194
3	5,98	762	37	43,89	6278	71	205,1	32551
4	6,40	818	38	46,21	6631	72	213,3	33956
5	6,84	878	39	48,63	7000	73	221,8	35410
6	7,31	941	40	51,16	7388	74	230,6	36915
7	7,80	1008	41	53,79	7793	75	239,6	38471
8	8,32	1079	42	56,54	8218	76	248,9	40082
9	8,87	1154	43	59,41	8663	77	258,5	41747
10	9,45	1234	44	62,40	9127	78	268,4	43468
11	10,06	1318	45	65,52	9614	79	278,6	45247
12	10,71	1408	46	68,77	10122	80	289,1	47084
13	11,38	1502	47	72,15	10653			

KUVA 4. Ilman kyllästyskosteuksia eri lämpötiloilla ilmakehän paineessa (Björkholtz 1987, 45).

Ilman kosteuspiitoisuus voidaan ilmoittaa useilla eri tavoilla. Ilman absoluuttinen kosteus kertoo, kuinka paljon vettä on tietyssä määrässä kuivaa ilmaa. Absoluuttisen kosteuden yksikön jakajana voidaan käyttää laskentatapauksen mukaan joko kuivan ilman massaa tai tilavuutta. Ilmastointiprosesseissa kuivan ilman määrä ei muutu kosteuden muuttuessa, joten laskennassa käytetään usein

yksikkö [g/kg]. (Seppänen 1996, 187.) Toinen mahdollinen yksikkö on ilmoittaa vesihöyryn määrä grammoina kuivan ilman tilavuutta kohti, eli [g/m³] (Björkholtz 1987, 46).

Vesihöyryn määrä voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaineena. Tämä kertoo, kuinka suuri osuus ilmanpaineesta on vesihöyryn aiheuttamaa. Kuivan ilman paineen ja vesihöyryn paineen summa on ilman kokonaispaine. Osapaineen yksikkö on pascal [Pa]. Laskennassa ilma oletetaan ideaalikaasuksi, jolloin ilman ja vesihöyryn osapaineet voidaan laskea yleisen kaasuvakion R avulla. (Björkholtz 1987, 44.)

$$p * V = \frac{m}{M} * R * T \quad (\text{KAAVA 1})$$

jossa

p = kaasun paine [Pa]

V = kaasun tilavuus [m³]

m = kaasun massa [kg]

M = kaasun molekyylipaino [kg/mol]

R = yleinen kaasuvakio [8314,3 J/(kmol*K)]

T = absoluuttinen lämpötila [K]

Tästä saadaan kaasun tiheydeksi ρ

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p * M}{R * T} \quad (\text{KAAVA 2})$$

Kaasuseoksessa yhtälö pätee kullekin kaasulle erikseen.

Vesihöyrypitoisuuden v (kg/m³) ja vesihöyryn osapaineen p välillä on yhteys, joka voidaan johtaa kaavasta 3:

$$v = \frac{p_v * 18,02 \text{ kg/kmol}}{8314,3 \frac{\text{J}}{\text{kmol} * \text{K}} * T} = \frac{p_v}{461,4 * T} \quad (\text{KAAVA 3})$$

Suhteellinen kosteus kertoo, kuinka suuri osuus kyllästymispisteen kosteudesta ilmassa on vesihöyryä. Laskennan voi tehdä joko osapaineen tai absoluuttisen kosteuden avulla, kunhan kyllästymispiste on tiedossa. Suhteellisen kosteuden yksikkö on RH %. (Björkholtz 1987 45-46.)

$$RH = \frac{v}{vk} * 100 \% \quad (\text{KAAVA 4})$$

jossa

RH = ilman suhteellinen kosteus [%]

v = vesihöyryn määrä [g/m³ tai g/kg]

vk = kyllästymiskosteus [g/m³ tai g/kg]

2.4.2 Konvektio

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa vesihöyryn liikkumista ilmassa tai muussa kaasussa lämpötilaerojen ja paine-erojen seurauksena. Pienestäkin ilmanvuotopaikasta rakenteen läpi konvektion avulla kulkeva vesihöyryn kosteusmäärä on huomattavasti suurempi kuin diffuusion kuljettama. Jotta vesihöyryn siirtyminen rakenteisiin voidaan estää, tulee ilman vuotaa kuivasta tilasta kosteaan tilaan ja kylmästä tilasta kohti lämmintä tilaa. (RIL 1984, 116.)

2.4.3 Diffuusio

Diffuusio on toinen tapa, jolla vesihöyry voi liikkua, ja se eroaa konvektiosta siten, että se ei vaadi fluidin (kaasu tai neste) makroskooppista liikkettä. Vesihöyryn diffuusio tapahtuu molekyylien liikkeen avulla korkeammasta vesihöyrynpaineesta alhaisempaan vesihöyrynpaineeseen. Tämä on yleensä hidas prosessi ja tapahtuu erityisesti rakenteiden läpi. Lähestulkoon kaikki materiaalit läpäisevät joissain määrin vesihöyryä. (RIL 1984, 108; Siikanen 1996, 56.)

Diffuusion suunta määräytyy siitä, kummalla puolen rakennetta vesihöyryn osapaine-ero on suurempi suunnan ollessa suuremmasta osapaine-erosta pienempään osapaine-eroon. Tämän takia suunta on yleensä lämpimästä tilasta kylmään tilaan, sillä lämmin ilma voi sisältää enemmän vesihöyryä.

Diffuusion aiheuttaman haitallisen kosteuden kertymisen ehkäisemiseksi rakenteet tulee suunnitella siten, että lämmöneristeen ja korkeamman vesihöyryn osapaine-eron omaavan tilan välillä on höyrynsulku. Lisäksi rakenteen tulee olla sellainen, että sen eri kerrosten vesihöyrynvastus pienee kohti pienemmän osapaine-eron omaavaa tilaa. (Siikanen 1996, 56.) Tämä tarkoittaa tavallisissa rakennuksissa siis sitä, että höyrynsulku on lämmöneristeen sisäpinnassa ja rakenteen vesihöyrynvastus pienenee sisältä ulospäin. Tällöin kosteus ei pääse diffusoitumaan sisältä rakenteisiin ja toisaalta mahdollistetaan rakenteen kuivuminen ulkotilaan.

2.5 Rakennuksen vaipan tiiveys

Rakennuksen ulkovaippa on useista syistä tärkeä saada tiiviiksi. Vaipan läpi kulkevat ilmavirrat kuljettavat mukanaan epäpuhtauksia ja kosteutta ja lisäävät rakennuksen lämpöhäviöitä. Sisätilan ollessa ylipaineinen ulkoilmaan nähden, sisältä ulos vuotava kostea ilma kondensoituu rakenteeseen, jolloin syntyy myös kosteusvaurion riski. Sisätilan ollessa alipaineinen ilma kulkeutuu ulkoa sisään, ja saattaa kuljettaa mukanaan epäpuhtauksia huoneilmaan. Vaipan tiiveys edesauttaa myös paloturvallisuutta estäen savukaasujen leviämisen. Ilmanvuotopaikat heikentävät myös vaipan ääneneristävyyttä. (Ympäristöministeriö 2022, Rakenteiden ilmatiiveyden parantaminen, 8-9.)

Rakennuksen tiiveyttä kuvataan ilmanvuotoluvulla q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$], joka ilmaisee, kuinka monta kuutiometriä ilmaa kulkee ulkovaipan lävitse jokaista ulkovaipan neliometriä kohti paine-eron ollessa 50 pascalia. (SFS-EN ISO 9972:2015).

Tiiveys todetaan mittaamalla. Mittaus tehdään mittauslaitteistolla, johon kuuluu paineistuspuhallin ilmavirtamittauksella, paine-eromittari sekä näitä ohjaava tietokone. Joissain tapauksissa on tarpeen käyttää rakennuksen omaa ilmanvaihtojärjestelmää avuksi mittauksessa. Mittaus tehdään useammalla eri paine-erolla. (Paloniitty 2012, 30.)

Ilmanvuotoluvun määrittämisessä mittaus suoritetaan yleensä alipaineistamalla rakennus, mutta on suositeltavaa tehdä mittaus myös ylipaineistamalla rakennuksen sisätilat. Vaipan ilmanvuotoluku voi muuttua paine-eron suunnan muuttuessa. (Rakennustieto Oy 2009, RT 80-10974).

Kun tiedetään vaipan ilmanvuotokerroin q_{50} , voidaan kaavalla 5 laskea vuotoilman määrä vaipan yli paine-eron ollessa pienempi (Björkroth 2019, 14).

$$q_v = q_{50} * \left(\frac{\Delta p}{50 \text{ Pa}} \right)^n * A_{\text{vaippa}} \quad (\text{KAAVA 5})$$

jossa

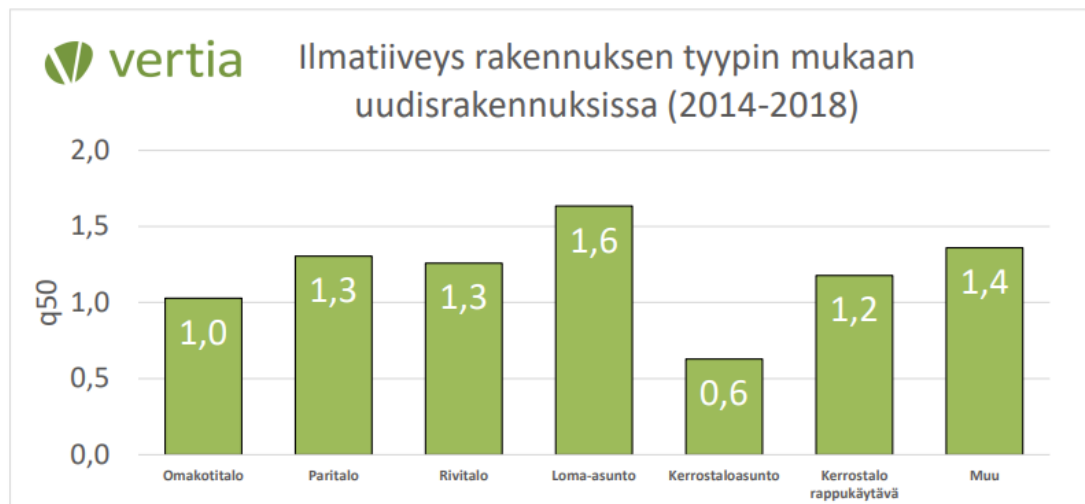
q_{50} = rakennuksen vuotoilmavirta 50 Pa paine-erolla [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]

Δp = paine-ero vaipan yli [Pa]

n = ilmavirtauksen tyypistä riippuva eksponentti (0,5-1,0)

A_{vaippa} = vaipan pinta-ala [m^2]

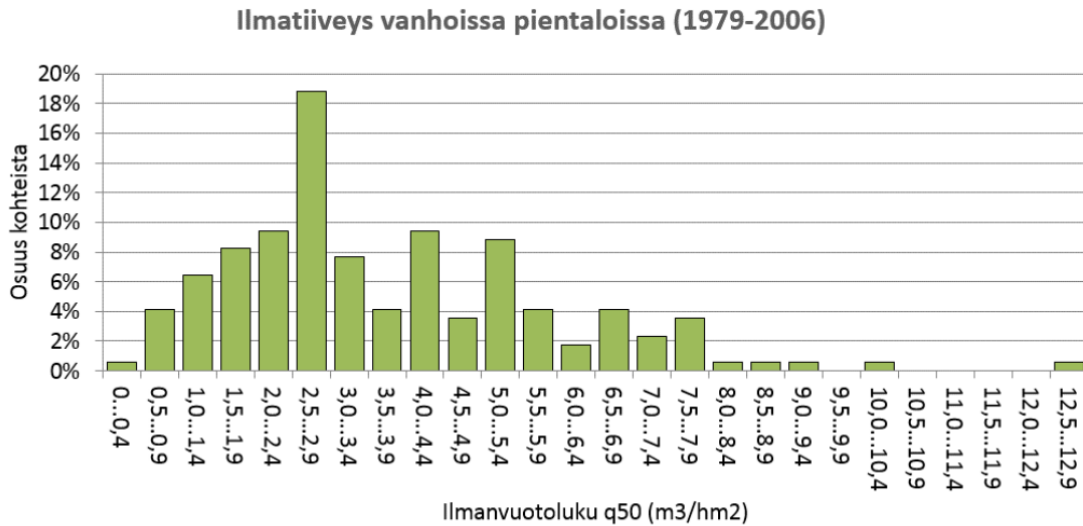
Vertia Oy:n vuonna 2018 julkaistussa raportissa, jossa on käyty läpi tuhansien vuosina 2014-2018 valmistuneiden rakennusten ilmanvuotolukuja todettiin keskimääräiseksi ilmanvuotoluvuksi 1,1 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. Kyseisen raportin aineistoa tutkimalla voidaan saada käsitys uudisrakennusten ja vanhojen rakennusten tiiveyseroista. Kuvassa 5 on esitetty 167 uuden pientalon tiiveysmittaustulokset vuosilta 2014-2018. Kuvasta voidaan todeta, että uusien rakennusten ilmatiiveys on hyvällä tasolla. Energiatoteutusmääräyksissä ilmanvuotoluvun q_{50} vertailutasona, eli perustasona johon uudisrakennuksien tulee pyrkiä, on 2,0 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, ja korkein sallittu on 4,0 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. (YM 1010/2017 25 § ja 27 §).



KUVA 5. Ilmanvuotoluvut uudisrakennuksissa 2014–2018 (Jussila, 2018).

Vanhojen rakennusten osalta tilanne on eri. Vertia Oy:n raportissa viitataan Tampereen Teknillisen yliopiston tutkimuksiin, joissa vanhojen pientalojen ilmanvuotoluvun keskiarvoksi on saatu 3,7

$\text{m}^3/(\text{h m}^2)$. Vanhoissa kohteissa ilmanvuotolukujen hajonta on suurta. Kuvassa 6 on esitetty 170 vanhan pientalon mittaustulokset, josta voidaan todeta hajonnan olevan suurta.



KUVA 6. Ilmanvuotoluvut vanhoissa pientaloissa (Jussila, 2018).

Kuten kuvasta 6 nähdään, valtaosa rakennuksista ylittää ilmanvuotoluvultaan nykyisen perustason, eli $2,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Joka neljännessä rakennuksessa ilmanvuotoluku on ollut $5,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ tai yli. Voidaan todeta, että rakennusten ilmatiiveys on parantunut vuosien varrella.

2.6 Rakennuksen vaipan yli muodostuva paine-ero

Rakennuksen vaipan yli muodostuvan paine-eron aiheuttavat ilmanvaihdon lisäksi ulkoiset tekijät, eli tuuli ja lämpötilaeroista johtuva terminen paine-ero. Terminen paine-ero tunnetaan myös hormi-vaikutuksena tai savupiippuilmionä. (Ympäristöopas 2019, 61.)

Ulkovaipan tiiveydellä on myös suuri vaikutus muodostuvan paine-eron suuruuteen. Vaipan tiiveyden parantaminen vähentää ulkoisen vaikutusten aiheuttamaa paine-eroa, eli tuulen ja termisen paine-eron vaikutuksia. Samalla tiivis ulkovaippa korostaa ilmanvaihdon suunnittelun merkitystä, sillä mitä tiiviimpi ulkovaippa on, sitä suuremman paine-eron aiheuttaa tietty tilavuusvirtaepätasapaino tuloilman ja poistoilman välillä. (Eskola & Björkroth 2020, 195-196.)

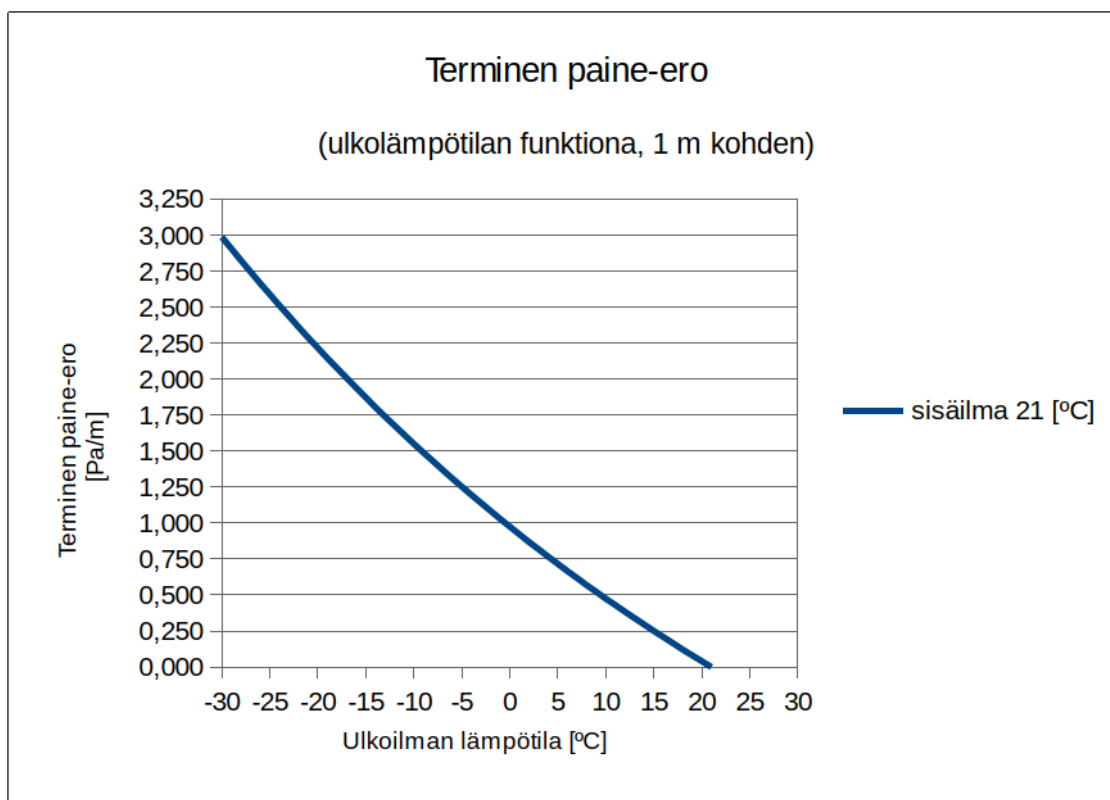
2.6.1 Ilmanvaihdon vaikutus

Ilmanvaihdolla on suora vaikutus rakennuksen painesuhteisiin. Mikäli ilmaa siirretään massavirtana sisään enemmän kuin sitä poistetaan, aiheuttaa se ylipainetta rakennukseen. Mikäli ilmaa poistetaan enemmän kuin sitä tuodaan, syntyy alipaine. (Kuurola 2015, 14.) Erilaisia ilmanvaihtojärjestelmiä käsitellään tässä työssä tarkemmin omissa osioissaan.

Ilmanvaihtoa mitoittaessa järjestelmän painehäviöt mitoitusilmavirralla lasketaan tavanomaisesti ilman tiheydellä $1,2 \text{ kg/m}^3$. Ilman lämpötilan muuttuessa esimerkiksi lämmityspatterissa myös sen tiheys muuttuu, ja samalla massavirralla saadaan eri suuruinen tilavuusvirta. Tämä tulee huomioida suunnittelussa, jossa ilman tiheyden muuttuminen sitä käsitellessä ei aiheuta ilmavirtojen epätasapainoa (Sandberg 2014b, 107 ja 111-112.)

2.6.2 Terminen paine-ero

Terminen paine-ero johtuu sisäilman ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta. Ilman tiheys vaihtelee sen lämpötilan mukaan. Tämä aiheuttaa luonnollista konvektiota kevyen lämpimän ilman nousussa ylöspäin, josta johtuva paine-ero tunnetaan termisenä paine-erona. Sen yksikkö on Pa/m ja sen voimakkuus on suoraan verrannollinen lämpötilaeron suuruuteen sekä rakennuksen korkeuteen. Terminen paine-ero tunnetaan myös savupiippuvaikutuksena tai hormivaikutuksena. Kuvassa 7 on esitetty paine-eron suuruus ulkoilman lämpötilan funktiona. (Ympäristöopas 2016, 120; Björkroth 2019, 9; Kuurola 2015, 10-11.)

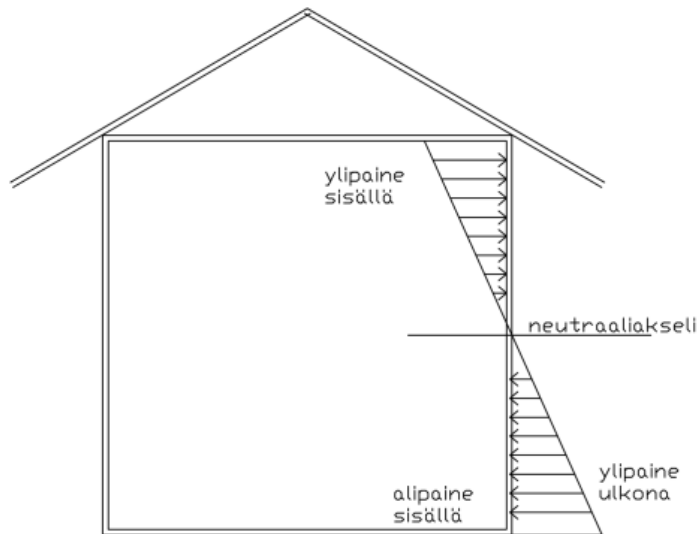


KUVA 7. Termisen paine-eron suuruus ulkoilman lämpötilan funktiona (Kuurola 2015, 12).

Tiheyserojen vuoksi sisällä oleva lämmin ilma pyrkii kevyempänä nousemaan ylöspäin, jolloin yläosiin muodostuu ylipaine ja alaosiin alipaine. Ilma virtaa rakennuksen sisällä kuiluja, porraskäytäviä ja välipohjien vuotopaikkoja pitkin alhaalta ylöspäin (Ranta-aho 2016, 5). Yli- ja alipainekerrosten rajapinnassa on neutraaliakseli. Akselin sijainti on riippuvainen rakennuksen aukotuksesta, ilmapuotopaikoista sekä ilmanvaihdosta. Täysin tiiviissä tilassa neutraaliakseli sijaitsee keskellä rakennusta. (RIL 1984, 116.) Käytännön neutraaliakselin korkeusaseman määrittämisestä kerrotaan Marko Björkrothin vuoden 2019 raportissa seuraavasti (Björkroth 2019, liite 1):

Jos rakennuksessa ei ole ilmanvaihtoa eikä merkittäviä ilmapuotoja ja eri kerrokset ovat toisiinsa yhteydessä esimerkiksi avoimen portaikon kautta, paine-eron nollatason pitäisi asettua korkeussuunnassa rakennuksen puoliväliin - -. Jos ulkovaipassa on suuria vuotoreittejä, esimerkiksi avoin ikkuna, paine-eron nollataso siirtyy tätä vuotoreittiä kohti. Tästä syystä ulko-oven avaaminen johtaa kylmällä säällä ylipaineen kasvuun rakennuksen yläosassa.

Kuvassa 3 on esitetty periaattemaisesti termisen paine-eron jakautuminen rakennuksen poikkileikkauksessa. Vaikka neutraaliakselin paikka vaihtelee, pääperiaate on, että alipaine on suurimmillaan rakennuksen alaosassa ja ylipaine suurimmillaan rakennuksen yläosassa.



KUVA 3. Termisen paine-eron jakauma (Kuurola 2015, 13).

Termisen paine-eron suuruus voidaan laskea kaavalla 6 (Sandberg 2014b, 107).

$$\Delta p = \rho * g * h * \frac{(T_s - T_u)}{T_u} \quad (\text{KAAVA 6})$$

jossa

Δp = lämpötilaeron aiheuttama paine-ero ulkovaipan yli [Pa]

ρ = sisäilman tiheys [kg/m³]

g = putoamiskiintyvyys 9,81 m/s²

h = hormivaikutuksen korkeus [m]

T_s = sisäilman absoluuttinen lämpötila [K]

T_u = ulkoilman absoluuttinen lämpötila [K]

Mikäli halutaan laskea termisen paine-eron suuruus rakennuksen vaipan yli jollain tietyllä korkeudella, tulee neutraaliakselin korkeusasema määrittää. Korkeusasema voidaan määrittää laskennallisesti kaavalla 7 (Jae-Hun ym. 2009, 285).

$$h_{NPL} = \frac{H}{1 + \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 * \frac{T_s}{T_u}} \quad (\text{KAAVA 7})$$

jossa

H = rakennuksen korkeus [m]

A_1 = vuotoaukkojen pinta-ala rakennuksen yläosassa [m^2]

A_2 = vuotoaukkojen pinta-ala rakennuksen alaosassa [m^2]

T_s = sisäilman lämpötila [K]

T_u = ulkoilman lämpötila [K]

Kun neutraaliakselin korkeusasema on tiedossa, voidaan paine-eron suuruus tarkastelupisteessä laskea kaavalla 8 (ASHRAE 2005, 27.5).

$$\Delta p_s = (h - h_{NPL}) * (\rho_u - \rho_s) * g \quad (\text{KAAVA 8})$$

jossa

Δp_s = lämpötilaeron aiheuttama paine-ero ulkovaipan yli tarkasteltavassa pisteessä [Pa]

h = tarkastelupisteen korkeusasema [m]

h_{NPL} = neutraaliakselin korkeusasema [m]

ρ_u = ulkoilman tiheys [kg/m^3]

ρ_s = sisäilman tiheys [kg/m^3]

g = putoamiskiintyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$

Ilman tiheys voidaan laskea kaavalla 9, kun tiedetään sen lämpötila. Ilman tiheys on kääntäen verrannollinen sen lämpötilaan (Björkroth 2019, Liite 1).

$$\rho = \frac{p * M}{R_u * T} \quad (\text{KAAVA 9})$$

jossa

ρ = sisäilman tiheys [kg/m^3]

T = ilman absoluuttinen lämpötila [K]

M = ilman moolimassa [29 $kg/kmol$]

p = ilmanpaine [Pa]

R = yleinen kaasuvakio [8314,3 $J/(kmol * K)$]

Terminen paine-ero vaikuttaa myös ilmanvaihtojärjestelmän toimintaan. Kaavalla 10 voidaan laskea järjestelmän kanavistoon vaikuttava paine-ero, kun tiedetään sen avointen päiden välinen korkeus (esimerkiksi kerrostalon keskitetyssä ilmanvaihdossa alimman ja ylimmän kerroksen välisen

päätelaitteen korkeusero). Ilmavirta talvella termisen paine-eron huomioiden voidaan laskea kaavalla 10. (Sandberg 2014b, 107.)

$$q_{talvi} = \sqrt{\frac{\Delta p_{talvi}}{\Delta p_{kesä}}} * q_{kesä} \quad (\text{KAAVA 10})$$

jossa

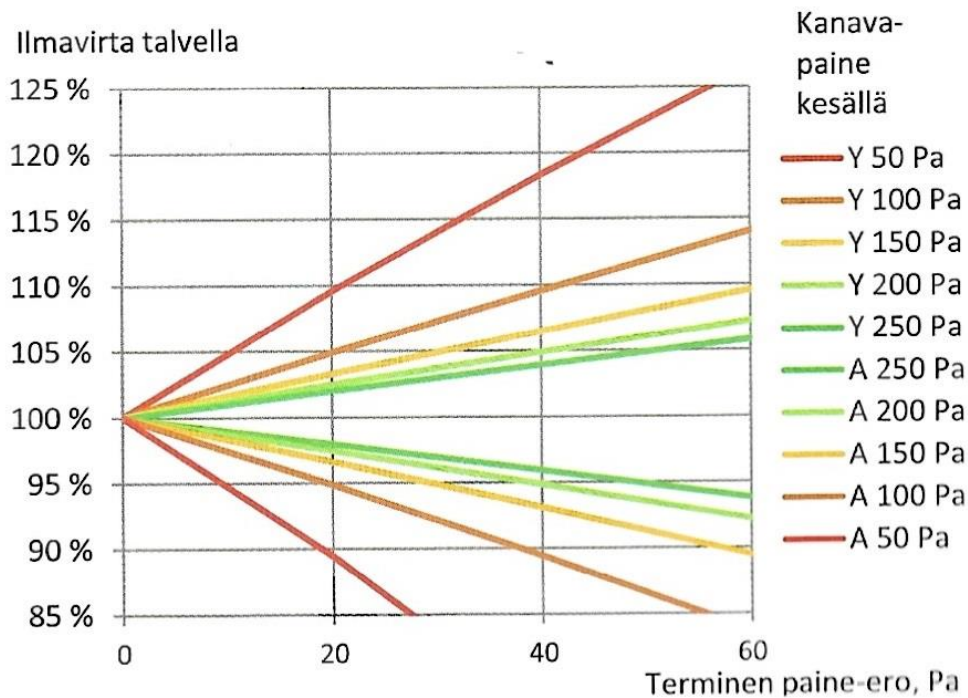
q_{talvi} = ilmavirta talvella [m³/s]

$q_{kesä}$ = ilmavirta kesällä [m³/s]

$\Delta p_{kesä}$ = kanaviston paine-ero kesällä [Pa]

Δp_{talvi} = kanaviston paine-ero talvella [Pa]

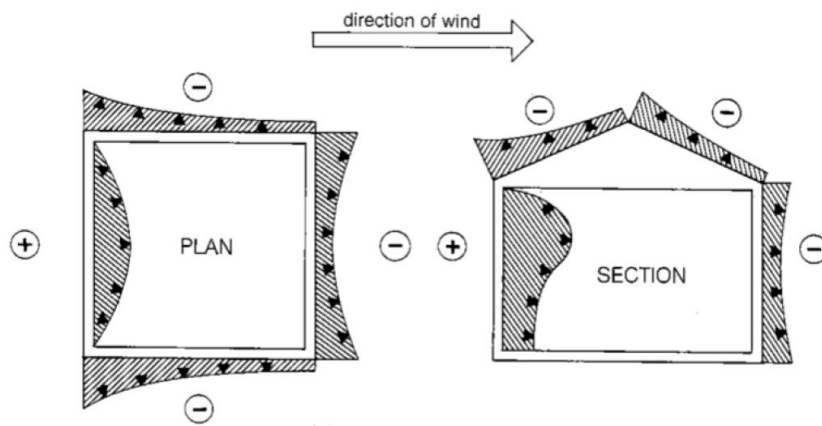
Ilmavirran muutokseen vaikuttaa siis se, kuinka suuri osuus kanaviston kokonaispaine-erosta termisen paine-ero on. Suuremmalla kanavapaineella termisen paine-eron osuus jää pienemmäksi, jolloin myös muutos on pienempi. Tämä on esitetty kuvassa 4. Mikäli halutaan ilmavirran vaihtelun pysyvän 10 prosentissa, tulee kanaviston painetasoon olla 4,8-kertainen hormivaikutuksen aiheuttamaan painetasoon nähden (Nybergh 2014, 31.)



KUVA 4. Termisen paine-eron vaikutus ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtaan (Sandberg 2014b, 108).

2.6.3 Tuuli

Tuuli aiheuttaa ylipainetta sille julkisivulle, johon se kohdistuu, ja alipainetta muille julkisivupinnoille. Tämä on kuvattu kuvassa 5. Rakennuksen sisään muodostuva painetaso voi muodostua tästä syystä tuulen suunnan mukaan joko yli- tai alipaineeksi. Mikäli ilmavuotoja on enemmän tuulen suojaisilla julkisivuilla, muodostuu rakennukseen alipaine. Mikäli tuulen vastainen seinä on vuotavampi, muodostuu rakennukseen ylipaine. (Ympäristöopas 2016, 119.) Paineen voimakkuus on riippuvainen tuulen voimakkuudesta. Tuulen voimakkuus taas on riippuvainen paikallisista tuuliolosuhteista, joihin vaikuttavat rakennuksen sijainnin lisäksi sen muoto, maaston ominaisuudet sekä ajankohta. (Ympäristöministeriö ja RAFnet 2020, V.4.1.)



KUVA 5. Tuulen vaikutus julkisivupintoihin nähden (Liddament 1986, 3.7.)

Rakennukseen kohdistuva tuulen aiheuttama painejakauma ilmaistaan pinnan muotokertoimilla. Muotokertoimet ilmaisevat millaisen painevaikutuksen tuuli saa aikaan. Positiivinen muotokerroin tarkoittaa, että tuulen kohtaamalle pinnalle muodostuu ylipaine ja negatiivinen muotokerroin puolestaan alipaineen muodostumista. (Ympäristöopas 2016, 119.) Kuvasta 4 voidaan esimerkiksi nähdä, että tuulen vastaisella seinällä on positiivinen muotokerroin ja harjakaton molemmilla lappeilla negatiivinen.

Tuulen aiheuttama paine-ero voidaan laskea muotokertoimien erotuksen avulla kaavalla 1 (Ympäristöopas 2016, 119).

$$\Delta p = (\mu_u - \mu_s) * \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{KAAVA 1})$$

jossa

Δp = paine-ero [Pa]

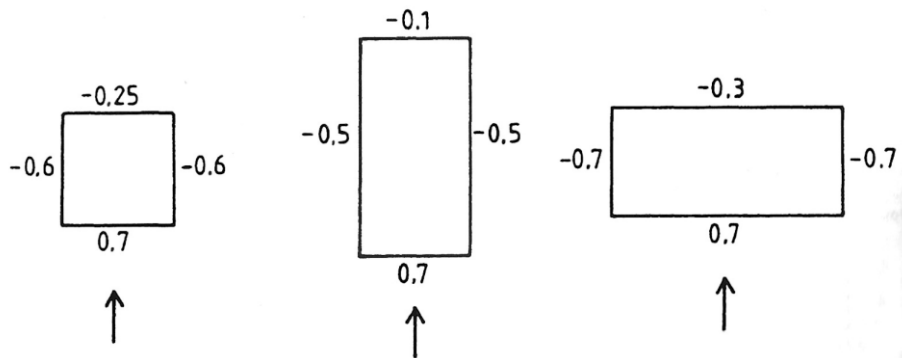
μ_u = ulkopuolinen muotokerroin

μ_s = sisäpuolinen muotokerroin

ρ = ilman tiheys [kg/m³]

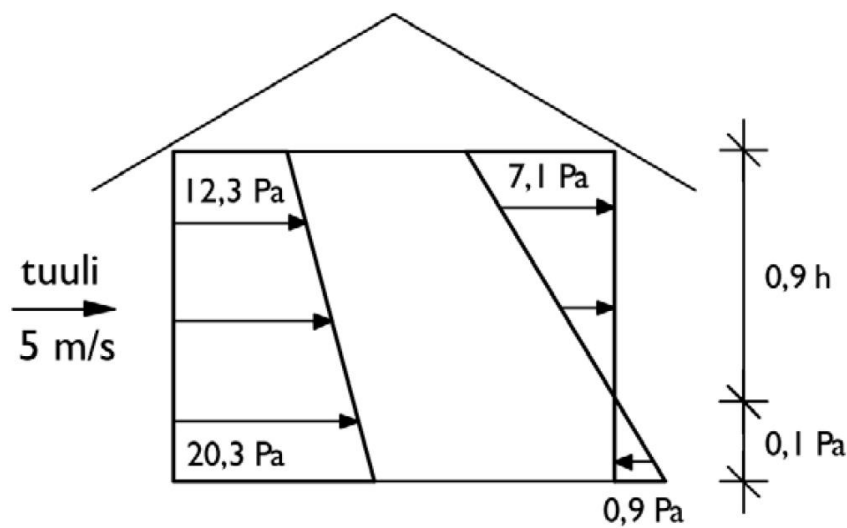
v = tuulen nopeus [m/s]

Kuvassa 6 on esitetty joidenkin yksinkertaisten tapausten muotokertoimia. Kertoimet ovat yksinkertaistettuja, eivätkä ne todellisuudessa ole tasaisia koko seinustalla. (Seppänen 1996, 212.)



KUVA 6. Tuulen vaikutuksen ulkopuolisia muotokertoimia (Seppänen 1996, 212).

Kuvassa 7 on esitetty periaate julkisivun eri osien yli vaikuttavasta paine-erosta, kun otetaan huomioon sekä ilmanvaihdon, tuulen että termisen paine-eron vaikutus. Ilmanvaihdon vaikutus on tasainen kaikkialla. Termisen paine-ero kasvaa tasaisesti alhaalta ylöspäin, kun taas tuulen vaikutus on eri korkeuksilla ja eri seinillä erilainen. Tämän takia on huomattavissa, että tuulen suojaisella seinustalla alareunassa yhteisvaikutus on alipaineinen sisätilaan nähden samanaikaisesti, kun se muualla on vaihtelevasti ylipaineinen.



KUVA 7. Termisen paine-eron, ilmanvaihdon ja tuulen yhteysvaikutus (Ympäristöopas 2016, 122).

2.7 Rakennuksen ulkovaipan rakenteet

2.7.1 Höyrynsulku ja ilmansulku

Rakenteissa käytetään erilaisia ratkaisuja ilmansulkuun sekä höyrynsulkuun. Ilmansulku on ainekerros, jonka tehtävä on estää konvektio, eli ilmavirtaus, rakenteen läpi. Höyrynsulun tehtävä taas nimensä mukaisesti on estää höyryn kulkeutuminen, eli diffuusio, rakenteen läpi. Höyrynsulku toimii yleensä myös ilmansulkuna, mutta ilmansulku ei välttämättä toimi höyrynsulkuna. (Kattoliitto Ry 2022, 13 ja 22; Isover 2023.)

Erilaisia ilmansulkumateriaaleja ovat esimerkiksi rakennuspaperi tai höyrynsulkumuovi. Myös massiivirakenne, kuten puu tai betoni toimii ilmansulkuna, mikäli siinä ei ole läpi ulottuvia halkeamia. Myös vesieristekerros tai muuratun harkkorakenteen tasoiterakenteet toimivat ilmansulkuina. Eri rakennosien ilmasulut tulee liittää tiiviisti toisiinsa, jottei niiden liitospaikkoihin muodostu ilmanvuo- topaikkoja. (Ympäristöministeriö 2019:18, 52.)

Höyrynsulun tehtävänä on estää rakenteiden läpi sisältä ulospäin suuntautuva haitallinen vesi- höyryn diffuusio. Tämän vuoksi höyrynsulun tulee sijaita rakenteen lämpimällä puolella ja sen on

oltava materiaalia, jonka vesihöyrynvastuksen on oltava riittävän suuri. Höyrynsulkuna voidaan käyttää esimerkiksi muovikalvoa. (Rakennustieto Oy RT 103274, 4.)

Höyrynsulkuna voidaan käyttää myös olosuhteiden mukaan muuttuvaa materiaalia, eli niin sanottua hygrokalkvoa. Hygrokalkvon vesihöyrynvastus muuttuu ilman suhteellisen kosteuden mukaan. Ympäristön ilmankosteuden ollessa alhainen vesihöyrynvastus on suuri, jolloin diffuusiota ei pääse tapahtumaan. Ilmankosteuden kasvaessa vesihöyrynvastus laskee. (Isover 2023.)

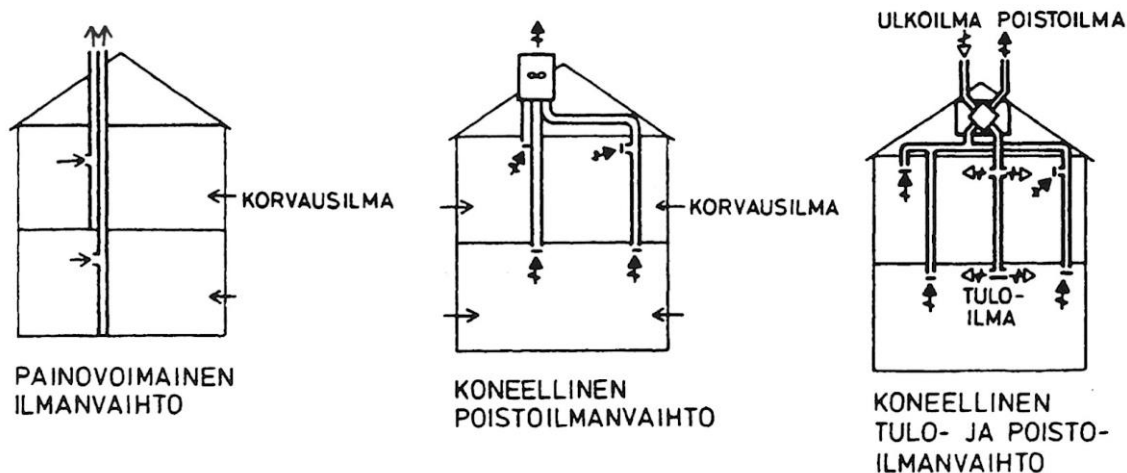
2.7.2 Rakenteiden kosteustekninen toiminta

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta on oleellista, että rakenteeseen pääsevän kosteuden määrää rajoitetaan ja toisaalta rakenteen kuivuminen mahdollistetaan. Vinha ja Käkelä testasivat vuoden 1996 diplomityössään erilaisia seinärakenteita ja niiden kosteusteknistä toimivuutta. Kokeissa havaittiin, että rakenteen kosteudensitomiskapasiteetilla on suuri vaikutus rakenteiden vikasietoisuuteen konvektion ja diffuusion aiheuttamien kosteuskuormien osalta. Mikäli eristemateriaali ei pysty sitomaan ja luovuttamaan kosteutta itseensä, päätyy kosteus tuulensuojalevyn pintaan ja kondensoituu sinne. Eristeistä puukuitueristeet pystyvät sitomaan itseensä paljon kosteutta ja mineraalivillaeriste vain hyvin pienissä määrin. Kosteusrasituksen jatkuessa pitkään myös puukuitueristeen kapasiteetti tulee vastaan ja kosteus pääsee tiivistymään rakenteeseen. Kokeissa havaittiin myös, että ilman- ja höyrynsulun tiiveys on rakenteen kannalta paljon tärkeämpää kuin käytettävä eristemateriaali. (Vinha & Käkelä 1996, 64-65.)

2.8 Ilmanvaihtojärjestelmät

2.8.1 Ilmanvaihtojärjestelmien tyypit

Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmän jakautuvat kolmeen eri tyyppiin; painovoimaiseen ilmanvaihtoon, koneelliseen poistoilmanvaihtoon sekä koneelliseen tulo- ja poistoilmanvaihtoon (Ympäristöministeriö 2019:18, 61). Näiden periaatteet on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Eri ilmanvaihtojärjestelmien periaatteet (Seppänen 1996, 208).

Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta perustuu termisen paine-eron ja tuulen aikaansaamaan paine-eroon, joiden vaikutuksesta ilma liikkuu rakennuksesta sisään, hormia ylös ja sitä kautta ulos. Tämä on myös painovoimaisen ilmanvaihdon ongelma, sillä termisen paine-ero vaihtelee vuodenaikojen ja tuulikaan ei ole hallittavissa. Erityisen haastava on kesäaika, jolloin lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä on pieni, jolloin termisen paine-eron vaikutus jää pieneksi. Tuuli lisää kokonaisilmanvaihtoa merkittävässä määrin vasta, kun sen nopeus ylittää arvon 5 m/s. Talvella tilanne on parempi, kun termisen paine-ero on suuri ja ilmavirtausta täytyy jopa rajoittaa. Painovoimaista ilmanvaihtoa voidaan säätää lisäämällä ilman reitin paine-eroa, eli säätämällä venttiilien aukkoa pienemmäksi tai suuremmaksi. (Seppänen 1996, 209-210.)

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa poistetaan rakennuksen ilmaa puhaltimen avulla. Ilma poistuu likaisista tiloista poistoilmaventtiilien kautta, ja korvausilma otetaan rakennuksen vaippaan puhtaisiin tiloihin asennetuista korvausilmalaitteista. Koneellinen poistoilmanvaihto on hyvin tyypillinen ilmanvaihtojärjestelmä 1970-1980 lukujen rakennuksissa. (Motiva 2023.)

Koneellinen poistoilmanvaihto aiheuttaa rakennukseen vääjäämättä alipaineen. Alipaineen suuruus on riippuvainen ilmavirrasta, vaipan tiiveydestä ja korvausilma-aukkojen mitoituksesta. Koneelliseen poistoon suunnitellut korvausilmaventtiilit on yleisesti suunniteltu toimimaan 10-15 Pa paine-erolla. (Björkroth 2019, 15.)

Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä myös tuloilman määrää hallitaan puhaltimilla. Tuloilmaa myös käsitellään suodattamalla siitä epäpuhtauksia ja lämmittämällä se haluttuun lämpötilaan, jotta vältetään vedolta. Tuloilmaa voidaan myös jäähdyttää tai viilentää. Poistoilmasta

siirretään yleensä lämpöä tuloilman lämmittämiseen erilaisilla lämmöntalteenottoratkaisuilla. Tuloilmaa voidaan käsitellä myös kostuttamalla tai kuivaamalla sitä. Olemassa on myös kosteutta poistoilmasta tuloilmaan siirtäviä lämmöntalteenottolaitteita, joilla saadaan talvella huoneilman kosteus pysymään korkeamana. (Sandberg 2014a, 82 ja 116-119.)

Aiemmin tuloilmamäärä mitoitettiin pienemmäksi kuin poistoilmamäärä, sillä haluttiin varmistua siitä ettei rakennukseen muodostu ylipainetta. Vielä vuoden 2012 rakennusmääräyskokoelman osassa D2 suositeltiin rakennuksen suunnitteleminen alipaineiseksi. (RakMk D2 2012, 3.7.6.1.) Nykyisin myös alipaineen vaarat on alettu tunnistaa, ja ilmanvaihto suositellaan mitoitettavan tasapainoiseksi (Finvac ry 2019, 4).

2.8.2 Suodattimet

Ilmanvaihtokoneissa on suodattimet sekä ulkoilmalle että poistoilmalle. Suodatus voi olla yksi- tai useampiportainen. Suodattimien tehtävänä on varmistaa sisäilman laatu ja IV-koneen toiminta, ja siksi poistoilmallakin täytyy olla riittävä suodatusaste. (Eurovent 2018, 4.6.) Rakennushankkeessa erityissuunnittelijan tulee suunnitella riittävä suodatuksen taso, joka määräytyy ulkoilman laadun sekä sisäilmastolle asetettujen vaatimusten mukaan (YM 1009/2017 12 §).

Ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtoja säädettyä tulee huomioida, että suodattimet likaantuvat ajan saatossa. Säättötyö tulisi tehdä suodattimilla, joiden painehäviö on puolet maksimipainehäviöstä (Talotekniikkainfo 2023, 27).

2.8.3 Ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen

Korjausrakentamisessa tyypillinen ilmanvaihtojärjestelmään kohdistuva toimenpide on ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen. Vanhemmassa rakennuskannassa yleiset painovoimainen ilmanvaihto tai koneellinen poistoilmanvaihto hukkaavat rakennuksesta poistuvan ilman mukana energiaa. Tuo energiamäärä on tavanomaisesti noin 30-50 % koko rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta (RTS 2010).

Painovoimaisen ilmanvaihdon koneellistaminen muuttaa painesuhteita kaikkein rajuimmin ja voi johtaa ilmavuotoihin rakenteista. Tilanne on parempi koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa,

mutta vaatii tarkkuutta mitoituksessa ja säätötyössä. Painovoimaisen ilmanvaihdon muuntaminen koneelliseksi poistoilmanvaihdoksi vaatii riittävien korvausilmareittien varmistamisen.

Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän muuttaminen lämmöntalteenotolliseksi tulo- ja poistoilmanvaihdoksi on painesuhteiden hallinnan kannalta helpompi tapaus, sillä alipaine rakennuksen vaipan yli vähenee merkittävästi.

Ilmanvaihtojärjestelmien tarkastelu on myös tehtävä silloin, kun rakennuksen vaipan tiiveyttä parannetaan, vaikkei itse korjaustyön varsinainen tarkoitus olisikaan muuttaa ilmanvaihtoa. Rakennuksen vaipan tiiveyden parantuessa mahdolliset entiset ilmapuodot siirtyvät eri paikkaan, joka voi hallitsemattomana aiheuttaa ongelmia. Yleinen esimerkki on kerrostalon ikkunoiden vaihto talossa, jossa on koneellinen poistoilmanvaihto.

3 PAINESUHTEIDEN HALLINTA

3.1 Keinojen löytäminen

Tässä osiossa käsitellään erilaisia keinoja, joilla rakennuksen painesuhteita ja niiden vaikutuksia voidaan hallita korjausrakentamisessa. Keinoja etsittiin yhdistämällä työssä läpikäytyä teoriaa sekä haastatteluissa saatuja vastauksia.

Työn teoriaa kasatessa tuli selväksi, että painesuhteet tulee ottaa huomioon kaikissa sellaisissa muutostöissä, joissa ollaan tekemisissä rakennuksen ulkovaipan, sisäisten rakenteiden tai ilmanvaihdon kanssa, tai mikäli tilojen käyttötarkoitus muuttuu. Lisäksi vallitsevan tilanteen selvittäminen ja korjaustarpeen arviointi olisi paikallaan vaikkei mitään oltaisi muuttamassakaan.

3.2 Henkilöhaastattelut

3.2.1 Haastattelujen toteuttaminen ja tarkoitus

Kirjallisuuslähteiden lisäksi tässä työssä haluttiin kerätä asiantuntijoiden hiljaista tietoa. Tämän vuoksi toteutettiin henkilöhaastatteluita, joiden tuloksia hyödynnettiin ohjeistuksen laadinnassa.

Koska kyseessä on asiantuntijahaastattelu, tulee huomioida, että asiantuntijat saattavat tarvita aikaa pohtia vastauksiaan perusteellisesti ja perehtyä omiin materiaaleihinsa antaakseen täsmällisen ja kattavan vastauksen. Tästä syystä haastattelut toteutetaan sähköpostihaastatteluina. Sähköpostihaastattelussa kaikille esitetään samat kysymykset, joihin he saavat vastata ajallaan. Kyseessä on siis puolistrukturoitu haastattelu.

Toisin kuin suulliset haastattelut, joissa kysymyksiin on vastattava reaaliajassa ja jotka voivat aiheuttaa painetta haastateltavalle, sähköpostihaastattelu antaa haastateltavalle mahdollisuuden käyttää riittävästi aikaa vastausten harkitsemiseen. Tämä voi johtaa syvällisempiin ja harkitumpiin vastauksiin. Lisäksi sähköposti mahdollistaa materiaalien, kuten esimerkiksi raporttien tai valokuvien liittämisen vastauksiin. Sähköpostihaastattelu antaa myös joustoa aikatauluttamiseen.

Haastattelujen tarkoituksena on kerätä näkemyksiä siitä, kuinka painesuhteita voisi hallita. Tarkoitus on lisäksi kerätä tietoa työkohteista, joissa on ratkottu paine-erojen aiheuttamia ongelmia tai ilmavuotojen aiheuttamia vaurioita.

3.2.2 Haastateltavien henkilöiden valinta

Haastateltavaksi valittiin henkilöitä, joilla on asiantuntemusta ja kokemusta rakennusfysiikasta ja korjausrakentamisesta. Haastateltaviksi kerättiin ilmanvaihdon asiantuntijoita sekä korjausrakentamisen ja kuntotutkimuksien parissa uraa tehneitä ihmisiä. Haastattelupyyntö lähetettiin kolmelle toista asiantuntijalle.

3.2.3 Haastattelukysymykset

Haastateltaville esitettiin seuraavat kysymykset. Lisäksi heitä pyydettiin lisäämään valokuvia mahdollisista esimerkkitapauksista ja pyydettiin lupaa julkaista kuvat osana opinnäytetyötä.

1. Kerro itsestäsi. Kuka olet, ja millainen on koulutuksesi ja työkokemuksesi rakennusalalla?
2. Oletko ollut mukana hankkeessa, jossa on todettu rakennuksessa haitallista yli- tai alipainetta ja etsitty sen hallintaan ratkaisua? Millaisia toimenpiteitä tehtiin? Onnistuiko korjaus?
3. Oletko kohdannut hallitsemattomien ilmavuotojen aiheuttamia rakennevaurioita tai sisäilmaongelmia? Millaisia vauriot olivat?
4. Mitkä rakenteet ovat kokemuksesi mukaan alttiita vaurioitumaan ilmavuotojen seurauksena?
5. Mitä olisi kokemuksesi mukaan tärkeä ottaa huomioon rakennuksen korjauksen suunnittelussa koskien rakennuksen painesuhteita?

3.2.4 Haastattelujen tulokset

Haastattelujen vastaukset ovat opinnäytetyön liitteenä, mutta niitä ei julkaista. Henkilöiden tietoturvan sekä yksityisyyden vuoksi ei ole perusteltua jakaa heidän vastauksiaan avoimesti liitteenä, eikä sillä myöskään ole työn kannalta suurempaa merkitystä. Vastaus saatiin neljältä asiantuntijalta,

joista haastateltavat numero 1 ja 2 ovat kokeneita sekä korjaus- että uudisrakentamiseen keskittyneitä LVI-suunnittelijoita, haastateltava numero 3 uudisrakentamiseen keskittynyt LVI-suunnittelija ja haastateltava numero 4 korjausrakentamisen ammattilainen.

Haastatteluissa ilmeni erilaisia näkökulmia paine-erojen huomiointiin, ja niissä näkyi hyvin erilaisen kokemuksen omaavien ihmisten eri näkökulma aiheeseen. Uudisrakennuksia suunnittelevat keskittyivät enemmän ilmanvaihdon tasapainon ylläpitämiseen ja korvausilmareittien- ja järjestelmien toimivaan mitoittamiseen. Korjausrakentamisesta kokemusta omaavien keskuudessa esiin nousi vanhojen rakennusten ongelmat, kuten rakenteiden huono ilmatiiveys. Koneellisen poistoilman yhteydessä korvausilmareittien järjestäminen on todettu haastavaksi, sillä paine-eroa pitäisi toisaalta olla korvausilmalaitteiden toiminnan takaamiseksi, mutta vanhojen rakennusten ilmatiiveys ei mahdollista kovin suuren paine-eron ylläpitoa turvallisesti.

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi painesuhteiden hallintakeinoja yhdistellen kerätyn kirjallisuusteorian tietoa sekä haastatteluissa esiin nousseita seikkoja. Tulevassa osiossa näiden keinojen pohjalta muodostetaan ohjekortin sisältö.

3.3 Ilmanvaihtoratkaisut paine-erojen hallintaan

Koska rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavat ilmanvaihdon lisäksi tuuli ja termisen paine-eron aikaansaama hormivaikutus, ei pelkällä ilmanvaihdolla voida täysin hallita paine-eroja. Oleellista onkin suunnitella rakennus ja sen ilmanvaihtojärjestelmä sellaiseksi, että paine-erot pyritään minimoimaan, ja että korvaus- ja siirtoilmareitit on mitoitettu oikein.

3.3.1 Painovoimainen ilmanvaihto

Painesuhteiden hallintaa ajatellen painovoimainen ilmanvaihto on kohtuullisen vaaraton, sillä se ei aiheuta suurta paine-eroa vaipan yli. Ongelmana on enemmänkin se, ettei paine-ero riitä kaikissa olosuhteissa aikaansaamaan riittävää ilmanvaihtomäärää.

Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä on yleinen vanhemmissa rakennuksissa. Kun näitä rakennuksia korjataan energiatehokkuutta tai tiiveyttä parantaen, tulee myös niiden ilmanvaihdon toiminta ja riittävä korvausilman saanti varmistaa (YM 4/13 11 §).

Kun painovoimaisella ilmanvaihdolla varustetun rakennuksen vaippaa tiivistetään, vuotoilman virtaus rakenteiden läpi vähenee. Ellei ilmalle ole järjestetty riittävästi korvausilma-aukkoja, voi ilmanvaihtomäärä vähentyä entisestä tilanteesta.

Kun korjataan painovoimaista ilmanvaihtoa, usein sen toimintaa halutaan parantaa ja lisätä sen säädettävyyttä. Jotta riittävä ilmanvaihtomäärä olisi mahdollista saavuttaa ja jotta välttyttäisiin ilma- vuodoilta rakenteiden lävitse, tulee korvausilmareitit suunnitella riittävän väljiksi. Toisaalta talvitalanteessa hormivaikutuksen ollessa suurimmillaan tulee järjestelmää voida säätää siten, ettei ilmanvaihto kasva liian suureksi aiheuttaen vetoa ja tarpeetonta lämpöhäviötä. Ympäristöministeriön opas ohjeistaakin suunnittelemaan tilaan kaksi venttiiliä, toisen todella väljän kesäajan käyttöä varten ja toisen tiukemman talviajan käyttöä varten. Tällöin väljempi venttiili voidaan talvella sulkea kokonaan ja ilmavirta pysyy hallinnassa. (Ympäristöministeriö 2018, 8.)

Rakennuksissa, joissa on useita kerroksia tai korkeita tiloja, tulee huomioida, että korvausilma-aukkojen lisääminen rakennuksen alaosiin siirtää termisen paine-eron neutraaliksi alaspäin, jolloin ylipaine rakennuksen yläosissa kasvaa. Tämä tulee huomioida suunnittelussa, jotta välttytään seinän ja yläpohjan liitoksen sekä yläpohjan kosteusvaurioilta. Tämä on erityisen tärkeää silloin, kun yläkertaan sijoittuu suuren kosteuskuorman tiloja, kuten kylpyhuone tai kodinhoituhuone.

Kaksikerroksisessa pientalossa on usein ongelmana yläkerran ylipaineisuus, joka ilmenee esimerkiksi ikkunoiden huurtumisella. Tämä ongelma ei koske pelkästään painovoimaisella ilmanvaihdolla varustettuja rakennuksia, mutta korostuu niissä sillä ylipainetta ei voi hillitä ilmanvaihdon säädöllä. Jotta välttyttäisiin kostean ilman tunkeutumisesta yläpohjaan ja ulkoseinien yläosiin tulisi yläkerassa olla riittävän väljästi mitoitetut poistoilmakanavat sekä korvausilma-aukot.

3.3.2 Koneellinen poistoilmanvaihto

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa saadaan ilmamäärä pidettyä haluttuna ohjaamalla poistopuhaltimen nopeutta. Haasteena onkin korvaus- ja siirtoilmareittien oikea mitoitus, jotta liiallinen paine-ero ulkovaipan yli vältettäisiin.

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa haasteena korjausrakentamisessa on rakenteiden huono ilmatiiveys. Paine-ero ulkoilmaan tulee olla riittävän suuri, jotta korvausilmalaitteet toimivat. Korkeiden rakennusten tapauksessa paine-eroa tarvitaan myös termisen paine-eron vaikutuksen voittamiseksi. Haastateltava numero 1 huomautti, että riittävän paine-eron saanti on hankalaa, sillä ilma vuotaa rakenteiden läpi eikä paine-eroa itse korvausilmalaitteen yli saada aikaan vaarantamatta sisäilmaa.

Haastateltava numero 1 esitti väljien korvausilmalaitteiden ongelmaksi ulkovaipan ääneneristävyyden heikkeneminen. Betoni-sandwich-rakenteessa huolena on myös korvausilma-aukon timanttikorauksen vaatiman poraamisveden päätyminen rakenteeseen ja sen aiheuttama riski rakenteelle.

Koneellisen poistoilmanvaihdon toiminnan parantamisessa olisikin erittäin tärkeää saada rakennuksen ulkovaippa mahdollisimman ilmatiiviiksi ja mitoittaa ulkoilmalaitteet riittävän väljäksi huomioiden ääneneristävyyden vaatimukset.

Haastateltava numero 3 näkemyksen mukaan koneellisen poistoilmanvaihdon ongelmia saataisiinkin parhaiten korjattua koneellistamalla myös tuloilma. Koneellinen poistoilmanvaihto kuluttaa myös paljon energiaa, joten olisikin järkevä tarkastella lämmöntalteenotollisen tulo-poistoilmanvaihdon rakentamisen vaikutus energiakustannuksiin. Kun huomioidaan pienentyneet energiakustannukset sekä parantuneet sisäilmaolosuhteet saattaa ilmanvaihdon saneeraus olla elinkaarikustannuksiltaan houkutteleva vaihtoehto.

3.3.3 Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto

Poistoilman ja tuloilman ilmamäärien erotus kulkee rakennuksen vaipan läpi. Tästä syystä ilmanvaihto tulee saada mahdollisimman tasapainoiseksi, jolloin minimoidaan ilmanvaihdon aiheuttama vuotoilman määrä ulkovaipan läpi.

Ilmamäärämittarit ovat kuitenkin melko epätarkkoja. Tämän vuoksi järjestelmiltä ei asetustasolla edes vaadita kovin tarkkaa suunnitelmien mukaisten ilmamäärien toteutumista, vaan toleranssit ovat järjestelmätasolla 10 % ja huonetasolla 20 % heitto. Björkrothin (2019, 12) raportissa, onkin mainittu, ettei tasapainotusta tulisi tehdä pelkästään ilmavirtoja mittaamalla, vaan olisi syytä mitata myös paine-ero vaipan yli ja hienosäätää ilmavirrat niiden mukaisesti.

Ilmanvaihtojärjestelmän vikasietoisuutta voitaisiin lisätä lisäämällä myös tasapainoon suunniteltavaan rakennukseen korvausilmareittejä ulkovaipan yli esimerkiksi rakoventtiilein. Paine-erojen ollessa lähellä nollaa venttiileistä ei liikkuisi juurikaan ilmaa läpi, mutta ne toimisivat sulakkeena tasoittaen esimerkiksi erillispoistojen, IV-koneen lämmöntalteenoton sulatustilanteen tai sääolosuhteiden aikaansaamia paine-eroja.

Tuloilma jakautuu rakennuksissa tyypillisesti epätasaisesti. Tuloilmaa tuodaan puhtaisiin tiloihin, joista se siirtyy poistettavaksi likaisista tiloista. Tämä aiheuttaa sen, että jotkin huoneet voivat olla ylipaineisia ulkoilmaan nähden ja toiset alipaineisia. Asia tulisi huomioida ja mitoittaa siirtoilmareitit riittävän väljiksi, jotta paine-ero ei kasvaisi haitallisen suureksi. Korkean kosteuskuorman tiloja ei tulisi ylipaineistaa lainkaan, vaan ne tulisi suunnitella aina alipaineisiksi. Mikäli tilassa ei ole lainkaan kosteuskuormaa tai kosteuskuorma on negatiivinen, eli ylipaineisuudestakaan ole vaaraa, vaan sillä voi olla jopa rakennetta kuivattava vaikutus. (Björkroth ym. 2020, 198-200).

Joskus on tarpeen ylipaineistaa tiloja hallitusti tilojen puhtauden ylläpitämiseksi. Haastateltava numero 2 kertoi, että näissä tilanteissa ylipaine on usein tarpeettoman suuri, mikä johtaa tarpeettomiin riskeihin. Ylipaineen tavoitetaso tulisikin määrittää riittäväksi, mutta ei haitallisen suureksi ja varmistua sen toteutumisesta mittauksin.

Haastateltava numero 2 kertoi myös, että hyvin tyypillinen ongelma on erillispoistojen aiheuttaman painevaihtelun hallinta silloin kun erillispoistolaitteita on useita. Ratkaisuna tähän esitettiin automaatio-ohjausta, joka antaa käyntiluvan vain sellaiselle määrälle erillispoistolaitteita että ilmanvaihdon tasapaino pysyy hallinnassa. Haastateltava korosti tässä suunnittelijan sekä käyttäjien keskustelun tärkeyttä, jotta päästään toimivaan ja käyttäjiä hyvin palvelemaan lopputulokseen.

3.3.4 Ilmanvaihdon suodattimien vaikutus

Ilmanvaihtokoneen suodattimien likaantuessa järjestelmän painehäviö kasvaa. Mikäli sitä ei kompensoida nostamalla puhaltimien pyörimisnopeutta, muuttuvat ilmavirrat. Suodattimet eivät myöskään likaannu tasaisesti, jolloin tulo- ja poistoilman painehäviöt kasvavat eri tahtia ja ilmavirtojen

tasapaino muuttuu. Suurissa järjestelmissä suodatinten likaantuminen voidaan huomioida ohjaamalla puhaltimien nopeutta esimerkiksi kanavapainemittauksen tai ilmavirtamittauksen perusteella, mutta omakotitaloluokan koneissa tällaista mahdollisuutta ei pääsääntöisesti ole.

On siis tärkeää saada järjestelmä toimimaan säätövaiheessa oikein, ja huolehtia sen jälkeen suodattimien kunnosta ja puhtaudesta, ja vaihtaa ne riittävän usein uusiin. Käytännössä suodattimia ei voida vaihtaa niin usein, että suodattimien likaantumisen aiheuttama ilmavirtojen muutos saataisiin täysin estettyä.

Tilannetta parantaa myös suuren pinta-alan omaavien suodattimien käyttäminen, sillä niiden painehäviö on pienempi sekä puhtaana että likaantuneena. Omakotitalokohteissa tämä on mahdollista käyttämällä erillisiä suodatinkoteloita ja niihin asennettavia pussisuodattimia.

3.3.5 Hormivaikutuksen huomiointi

Rakennuksessa muodostuva hormivaikutus on rakennuksen muodon määrittämä fyysinen ominaisuus, ja se tulee huomioida suunnitteluvaiheessa, jotta sen vaikutukset pysyvät hallinnassa.

Rakenteellisesti hormivaikutusta voidaan pienentää parhaiten osastoimalla rakennuksen pystykuilut, kuten tekniikkakuilut, hissikuilut ja porraskäytävät ilmatiivein rakentein. (Nybergh 2014, 101.) Tekniikkakuiluissa voidaan valaa kerrosten välille tiiviit välipohjat. Hissin ja portaikon tapauksessa umpeen valaminen haittaisi käyttöä, joten tarvitaan tuulikaappi kuilun ja kerrostasanteiden välille. Rakennuksen välipohjien tiiveys auttaa myös vähentämään hormivaikutuksen syntyä.

Rakennuksen ulkovaipan hyvä ilmatiiviyys vähentää myös hormivaikutuksen voimakkuutta pienentämällä rakennuksen vaipan läpi kulkevan ilman määrää (Cammelli & Mijorski 2016). Ulkovaipan ollessa tiivis siirtyy termisen paine-eron voima ulkovaipasta rakennuksen sisäisiin rakenteisiin, kuten hissikuilun seiniin. Hormivaikutusta voidaan pienentää myös pitämällä kuilujen lämpötila mahdollisimman matalana. Mitä pienempi ero ulkolämpötilan ja kuilun lämpötilan välillä on, sitä pienemmän hormivaikutuksen se aiheuttaa. (Nybergh 2014, 101).

Ilmanvaihto tulee suunnitella siten, että hormivaikutus eri vuodenaikoina on otettu huomioon. Koska hormivaikutuksen vuoksi rakennuksen ylä- ja alaosien painetasot vaihtelevat vuodenaikojen mukaan, vaihtelee myös ilmanvaihdon kanavapainetaso ja tätä myötä ilmavirrat. Kuten aiemmassa osiossa kerrottiin, on hormivaikutuksen vaikutus ilmanvaihdon toimintaan sitä pienempi, mitä suurempi painetaso kanavistossa on. Hormivaikutusta voidaan kompensoida myös ohjaamalla ilmanvaihtoa paineolosuhteisiin mukautuen esimerkiksi ilmavirtamittausten tai kanavapaineantureiden perusteella.

Rakenteiden tulee olla sellaisia, että ne kestävät hormivaikutuksen aiheuttaman paineenvaihtelun. Esimerkiksi yläkertaan muodostuva kostean ilman ylipaine tulee ottaa huomioon ja kiinnittää erityistä huomiota rakenteiden ilman- ja höyrynpitävyyteen. Vikasietoisuutta tässä saadaan sillä, että yläpohja on hyvin tuulettuva ja se pääsee kuivumaan, mikäli kosteus pääsee kulkeutumaan huonetilasta rakenteisiin. Alapohjan tiiveys on tärkeää rakennuksen alaosiin muodostuvan alipaineen vuoksi, jotta esimerkiksi radon ja epäpuhtaudet eivät pääse imeytymään alapohjasta huonetilaan.

3.4 Rakeneratkaisut

Haastateltava numero 4 toi ilmi rakenteiden vikasietoisuuden tärkeyden. Olosuhteet ovat harvoin täysin hallinnassa ja rakentamisessa tapahtuu inhimillisiä virheitä, joten olisi tärkeää, että rakenteet on suunniteltu kestäämään myös jonkinasteista virheellistä toimintaa.

3.4.1 Eristemateriaalit

Rakenteiden vikasietoisuutta voidaan lisätä valitsemalla sellaisia eristemateriaaleja, jotka pystyvät sitomaan ja luovuttamaan kosteutta. Rakenteen tulee kuitenkin olla sellainen, että se ehtii kuivua kosteusrasitustilanteiden välillä, jotta tästä kosteuspuskurista olisi hyötyä. Vikasietoisuutta lisää myös sellaisten materiaalien käyttö, jotka eivät ole herkkiä homehtumaan. Eristeitä ajatellen tässä joutuu valitsemaan jommankumman, sillä kosteutta sitovat, orgaaniset eristemateriaalit ovat herkempiä homehtumaan kuin esimerkiksi mineraalivilla.

3.4.2 Rakennuksen vaipan tiivistäminen

Rakenteiden tiivistäminen tulee tehdä harkiten ja se tulee suunnitella ottaen huomioon rakennus kokonaisuutena. Tiivistämistä suunniteltaessa on huomioitava myös sen välilliset vaikutukset. Kun jokin vaipan osa tiivistyy, kohdistuu jäljelle jääviin ilmanvuotopaikkoihin aiempaa suurempi paine-ero. Rakenteiden läpi kulkevalla ilmavirralla voi olla joissain tilanteissa myös kuivattava vaikutus, jolloin sen poistuessa on mahdollisuus kosteusvaurioon.

Kun rakenteita tiivistetään, on mahdollista, että termisen paine-eron neutraaliksi siirtyy ylemmäs tai alemmas. Ulkovaipan tiivistäminen alaosista siirtää akselia ylemmäs, jolloin paine-ero vaipan alaosissa kasvaa ja paine-ero yläosissa laskee. Yläosia tiivistäessä käy painvastoin.

Rakennusvaipan tiiveyteen tulee kiinnittää erityistä huomiota tiloissa, joista tulee ylipaineisia, sekä tiloissa, joissa on korkea kosteuskuorma. Rakennuksen yläpohjan liitosten tiiveys ja höyrynsulun eheys on tärkeä tekijä termisen paine-eron aiheuttaman ylipaineen haittojen ehkäisyyn. Haastatelluissa ilmeni, että rakennevaurioita on havaittu esimerkiksi vanhoissa omakotitaloissa yläpohjan ja ulkoseinän liitospaikassa keittiön kohdalla, josta kostea ilma on päässyt vuosien aikana virtaamaan rakenteen lävitse ja aiheuttamaan vaurioita.

3.5 Mittaukset

Rakennuksen paine-eroja ei useinkaan voi havainnoida aistinvaraisesti. Korjaushankkeen yhteydessä olisikin tärkeää toteuttaa riittävät mittaroinnit paine-erojen seuraamiseksi. Näin voidaan seurata rakennuksen toimintaa kokonaisuutena ja esimerkiksi ilmanvaihdon ilmavirtatasapainojen pysyvyyttä. Yhdistämällä paine-eromittaukset rakennusautomaatiojärjestelmään voidaan niitä hyödyntää myös ilmanvaihtojärjestelmän ohjauksessa. Mikäli paine-eromittauksille asetetaan hälytykset, tulee hälytyksen tapahtua vasta kun paine-ero on ollut pidemmän aikaa yli raja-arvon, jotta hetkelliset piikit eivät aiheuttaisi turhia hälytyksiä.

4 OHJEKORTIN SISÄLLÖN SUUNNITTELU

4.1 Kortin tarkoitus ja muoto

Ohjekortista ei ole tarkoitus tehdä kaiken kattavaa ja tarkkaa suunnitteluohjetta. Sellaisen antaminen ei ole rakennusvalvonnan tehtävä, eikä sellaisen laatiminen ole opinnäytetyön laajuuden puitteissa edes mahdollista. Ohjekortin tarkoitus on kiinnittää suunnittelijoiden ja rakennushankkeeseen ryhtyvän huomio opinnäytetyössä oleellisiksi havaittuihin seikkoihin, jotta suunnittelutyö helpottuisi.

Valmiin kortin laatiminen vaatii muidenkin kuin opinnäytetyön tekijän työpanosta sekä esimerkiksi saavutettavuuden huomiointia ulkoasussa ja sisällössä, joten valmista korttia ei tämän opinnäytetyön liitteeksi saada laadittua. Tässä työssä esitetään kortin tietosisältö ja runko, jonka avulla ohjekortti voidaan myöhemmin laatia.

Kortin ei ole tarkoitus olla raskaslukuinen tekstiseinä, vaan helposti selailtava luettelomainen teos. Eri kohdat numeroidaan, jotta niihin on helppo viitata. Lopulliseen ohjekorttiin voidaan laatia asioita selventäviä piirroksia. Kortti laaditaan eräänlaiseksi tarkastuslistaksi, jossa esitetään kysymyksiä rakennuksen ominaisuuksista tai tavoiteltavista asioista. Listan kysymysten ohkeen laaditaan opinnäytetyön tietosisällön pohjalta hoksautuksia huomioon otettavista seikoista.

4.2 Suunnittelun periaatteet

Korjausrakentamisessa on paljon muuttujia mukana, joista kaikkia on vaikea tai jopa mahdotonta pystyä huomioimaan. Yksinkertaiset, vikasietoiset ja mahdollisimman vähän asujan tai käyttäjän osaamista vaativat ratkaisut tapaavat olla kaikkein toimivimpia ja kestää parhaiten aikaa.

Painesuhteiden hallinta on erittäin vaikeaa muuttuvien ulkoisten olosuhteiden vuoksi. Tuulen suunta ja voimakkuus vaihtelee ja hormivaikutuksen voimakkuus on riippuvainen ulkoilman lämpötilasta. Tuuliolosuhteet voivat muuttua rakennuksen käyttöiän aikana esimerkiksi ympäröivästä lisärakentamisesta tai ilmastonmuutoksesta johtuen. Rakennus ehtii vuoden aikana nähdä todella monta olosuhdetta, joissa sen tulisi pysyä terveellisenä ja turvallisena.

Olisikin tärkeää tunnistaa rakennuksen riskipaikat liittyen paineolosuhteiden vaihteluun, ja suunnitella niiden varalle oikeat ratkaisut. Rakenteiden osalta tämä tarkoittaa tiettyjen rakennepaikkojen tiivistämistä, mikäli on tiedossa, että niihin kohdistuu painerasitusta joissain olosuhteissa. Tiivistyspaikkoja miettiessä tulee ottaa myös huomioon mahdollisten ilmavirtausten haitallisuus. Termisen paine-eron vaikutusta pystytään hillitsemään myös rakennuksen sisäisten vuotoilmareittien tiivistämisellä, jolloin rakennus jakaantuu pienempiin toisistaan suljettuihin ilmavyöhykkeisiin. Paine-eroja tulisi myös pyrkiä tasaamaan mahdollisuuksien mukaan antamalla ilmalle turvallisia reittejä rakenteiden yli. Esimerkiksi korvausilmaventtiilien lisääminen ikkunoiden yhteyteen, vaikka niitä ei ilmanvaihdon vuoksi varsinaisesti edes tarvittaisi, toimisi eräänlaisena sulakkeena ja vähentäisi paine-eroja rakenteiden haitallisissa vuotopaikoissa.

4.3 Lähtötilanteen tunnistaminen ja tavoitteiden asettaminen

Korjaus- tai muutostyön suunnittelun lähtökohtana täytyy olla riittävä tuntemus lähtötilanteesta. Jotta voitaisiin asettaa tavoitearvot painesuhteille, tulee tietää, millaiset ilmavuodot voidaan hyväksyä ja missä niihin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Korjaus- ja muutostöissä usein muutetaan myös tilojen käyttötarkoitusta tai henkilömäärää, mikä tulee myös huomioida suunnittelussa.

Seuraavaksi esitetään luettelomainen tarkastuslista, jonka kohteen suunnittelijat voivat käydä läpi kohta kohdalta. Luettelon kohdat eivät kerro suoria suunnitteluratkaisuja, vaan hoksauttavat asioista jotka tulee ottaa huomioon.

1. Tilojen ympäristö
 - a. Esiintyykö rakennuspaikalla radonia?
 - Jos esiintyy, tulee alapohjan tiiveyteen kiinnittää erityistä huomiota.
 - b. Onko ympäröivissä tiloissa tai esimerkiksi ryömintätilassa epäpuhtauksia, joiden kulkeutuminen rakennukseen tulee estää?
 - Ympäröiviä tiloja voidaan joutua alipaineistamaan, jotta varmistutaan siitä, ettei ilmavuotoja epäpuhtaista tiloista puhtaisiin tiloihin pääse syntymään olosuhteiden vaihdella. Alipaineelle on laskettava tavoite-taso.
 - c. Onko rakennus erityisen korkea?

- Mikäli on, tulee termisen paine-eron vaikutukset arvioida ja sen hallinnan mahdollisuudet arvioida. Esimerkiksi ulospuhallusilman puhaltaminen ulos seinäpinnasta voi tulla kyseeseen, mikäli ulospuhalluskanavan korkeus kasvaisi kovin suureksi.
 - Suunnittelun yhteydessä tulee arvioida rakennuksen vaippaan kohdistuvan termisen paine-eron suuruus ja sen aiheuttamien riskien hallintakeinot.
 - Kerrosten välistä ilman liikettä tulisi pyrkiä vähentämään mahdollisuuksien mukaan. Läpi talon kulkevat kuilut tulisi katkaista ilmatiiviisti kerroksittain ja rakennuksen välipohjien ilmatiiveyttä parantaa.
- d. Onko rakennus erityisen tuulisella paikalla?
- Mikäli on, tulee tuulen vaikutus paine-eroihin ja ilmavirtoihin huomioida. Esimerkiksi ulkoilmalaitteen sijoittaminen tuulenvastaiselle seinälle voi aiheuttaa ilmanvaihdon epävakaata toimintaa.
 - Ilmanvaihtolaitteistossa tulisi huomioida vaihtelevat ulospuhallusilman ja ulkoilmanoton paineolot ja kompensoida niiden vaikutusta esimerkiksi vakio paine-eroa kanavistossa ylläpitävällä ohjausjärjestelmällä.

2. Ilmanvaihto

- a. Onko rakennuksessa tulisijoja tai erillispoistoja?
- Mikäli on, tulee niille suunnitella riittävät korvausilmaratkaisut, jotta paine-erot eivät pääse heittelehtimään niiden käytön mukaan.
 - Erillispoistojen sekä tulisijojen korvausilman tilavuusvirran tarve on arvioitava ja korvausilmareitit on suunniteltava ilmavirtojen perusteella.
- b. Muuttuuko tilojen käyttäjämäärä, lämpökuorma tai kosteuskuorma?
- Mikäli muuttuu, tulee ilmanvaihdon riittävyys ja kohdentuminen tarkastella.
- c. Onko joillekin tiloille asetettu erityisiä vaatimuksia sisäilman puhtauden suhteen?
- Puhtautta vaativissa tiloissa on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota siihen, ettei ilmavuotoja rakenteista tai likaisista tiloista pääse muodostumaan.
- d. Onko joitain tiloja tarpeen ylipaineistaa ilman virtaussuuntien varmistamiseksi?

- Mikäli on, tulee ylipainelle asettaa maltillinen tavoitetaso ja sen toteutuminen tulee mitata. Mikäli tilassa on kosteuskuormaa, tulee diffuusiosta ja konvektiosta aiheutuva rasitus huomioida rakenteiden suunnittelussa.
- e. Millainen ilmanvaihtojärjestelmä rakennuksessa on?
- Rakennuksen sisällä painesuhteita voidaan hallita parhaiten koneellisella tulo-poistoilmanvaihdolla. Ilmanvaihtokone olisi suositeltavaa varustaa ohjausjärjestelmällä, joka sää-tää puhaltimien nopeutta pitäen ilmavirrat vakiona muuttuvista olosuhteista huolimatta. Kaikkein paras tapa olisi pitää ilman massavirta vakiona, jolloin myöskään sisään tulevan ilman lämpötilalla ei ole merkitystä ilmavirtojen tasapainon kannalta.
- f. Rakennuksessa on koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä.
- Koneelliseen tulo-poistoilmanvaihtoon siirtymisen mahdollisuus tulee selvittää.
 - Korvausilmareittien riittävyys tulee tarkastella ja paine-erolle ulkovaipan yli on asetettava tavoitetaso.
 - Korvausilmalaitteille on laskettava paine-ero sekä mitoitustilanteessa että ilmanvaihdon tehostustilanteessa.
 - Paine-eron suuruus ulkoilmaan nähden on mitattava korjauksen jälkeen riittävällä laajuudella.
- g. Rakennuksessa on painovoimainen ilmanvaihto
- Koneelliseen tulo-poistoilmanvaihtoon siirtymisen mahdollisuus tulee selvittää.
 - Painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaedellytykset on tarkistettava, ja tarvittaessa lisättävä korvausilman saantia ja säädettävyttä.
 - Tehostuspuhaltimien tarve ja toteutettavuus on tarkastettava.
- h. Onko ilmanvaihtojärjestelmä säädettävissä ja ilmavirrat mitattavissa?
- Ellei, tulee järjestelmää muokata säädön sekä ilmavirtojen mittaamisen mahdollistamiseksi. Mittausvaatimus ei koske painovoimaista ilmanvaihtoa.
- i. Onko paine-erojen suuruus ja järjestelmien toiminta varmistettu?

- Rakennuksen osien paine-ero ulkovaipan yli tulee mitata, ja mittauksista laatia pöytäkirja. Pöytäkirjassa tulee esittää myös vallitsevat olosuhteet, kuten lämpötila ja tuulen voimakkuus sekä suunta.
- Paine-erot tilojen välillä tulee mitata tarpeellisessa laajuudessa.

3. Rakenteet

- Onko rakennuksessa luotettava yhtenäinen ilman- ja höyrynsulku?
 - Ellei ole, voidaanko sellainen lisätä?
 - Höyryn- ja ilmansulun yhtenäisyyttä tulee parantaa mahdollisuuksien mukaan.
- Onko rakennuksen ulkovaippa kosteusteknisesti turvallinen ja vikasietoinen?
 - Ellei, tulee selvittää, kuinka rakenteen toimintaa voidaan parantaa.
- Onko rakennuksen ilmatiiveys mitattu tai arvioitu muutoin?
 - Mikäli ilmatiiveydessä on puutteita, tulee niitä korjata mahdollisuuksien mukaan tiivistyskorjauksin.
 - Tiiveysmittauksen lisäksi tiiveyttä voidaan arvioida esimerkiksi lämpökamerakuvauksilla.
- Onko rakennuksessa sisäisiä ilmavuotoja, esimerkiksi putkikoteloissa tai kerrosten välisissä kuiluissa?
 - Mikäli on, tulee vuotopaikat pyrkiä minimoimaan esimerkiksi valamalla kuiluihin välipohjat ja tiivistämällä seinäläpiviennit putkikoteloista. Tämä hillitsee termisen paine-eron voimakkuutta sekä vähentää tilojen välisiä hallitsemattomia ilmavuotoja.
- Jääkö rakennukseen haitta-aineita kapseloituna?
 - Mikäli jää, tulee painesuhteissa varmistua siitä, ettei kapseloituihin rakenteisiin kohdistu huoneilmaan suuntautuvaa paine-eroa.
- Jääkö rakennukseen tiloja, joiden sisäilmassa on ongelmia. Tällaisia voivat olla esimerkiksi käytöstä poistetut putkikuilut tai kellarit.
 - Mikäli jää, tulee ne erottaa ilmatiiviisti muusta rakennuksesta ja alipaineistaa. Tiloihin tulee tuoda korvausilma suoraan ulkoa tai koneellisesti kanavoituna.

4. Rakennuksen käyttö

- Onko rakennuksessa tiloja, joissa muodostuu paljon kosteuskuormaa?

- Mikäli on, tulee varmistua, ettei näihin tiloihin pääse muodostumaan ylipainetta. Tilojen rakenteiden ilmatiiveyteen ja ilmanvaihdon tasapainoon tulee kiinnittää erityistä huomiota.
- b. Onko rakennuksessa tiloja, jotka on tarpeen ylipaineistaa esimerkiksi siirtoilmavirtojen suunnan varmistamiseksi?
- Ylipaineistettavien tilojen ylipaineen taso tulee suunnitella riittäväksi, mutta välttää painetason ylimitoitusta. Ylipaineen suurus on todettava mittaamalla.
- c. Voidaanko paineolosuhteita seurata?
- Rakennukseen on suositeltavaa lisätä paine-eroa valvovia mittareita, jotta jatkuva toiminta voidaan varmistaa.

4.4 Muutosten vaikutus

Korjaushankkeessa tulee arvioida muutosten vaikutus rakennuksen ja sen järjestelmien toimintaan. Painesuhteiden hallinnan kannalta on tärkeä miettiä, kuinka muutokset vaikuttavat paineerojen muodostumiseen ja mihin ne kohdistuvat. Kun muutetaan yhtä asiaa, tulee selvittää mihin kaikkeen sillä on vaikutusta. Ilmanvaihtojärjestelmien ja rakennuksen oikea toiminta tulee varmistaa mittauksin riittävällä laajuudella. Toiminnanvarmistusmittauksia ovat esimerkiksi ilmatiiveysmittaus, lämpökamerakuvaus, ilmamäärien mittaus sekä paine-erojen mittaaminen tilojen välillä sekä ulkovaipan yli. Rakennukselle tulee laatia käyttö- ja huolto-ohje, jossa on esitetty, kuinka toimintaa seurataan ja ylläpidetään.

5 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli antaa korjausrakentamisen suunnittelijoille työkaluja suunnittelutyön laadun parantamiseen. Työssä kerättiin tietoa rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavista tekijöistä sekä keinoista niiden hillintään ja niiden vaikutusten hallintaan. Aihetta lähestyttiin kolmen tutkimuskysymyksen avulla. Tutkimuskysymyksiin on esitetty vastaukset seuraavissa osioissa.

5.1 Hankkeet, joissa paine-erot tulee huomioida

Työn teoriaa kasatessa tuli selväksi, että painesuhteet tulee ottaa huomioon kaikissa sellaisissa muutostöissä, joissa ollaan tekemisissä rakennuksen ulkovaipan, sisäisten rakenteiden tai ilmanvaihdon kanssa, tai mikäli tilojen käyttötarkoitus muuttuu. Lisäksi vallitsevan tilanteen selvittäminen ja korjaustarpeen arviointi olisi paikallaan vaikkei mitään oltaisi muuttamassakaan.

Rakennuksen paine-erot ja niiden aiheuttamat ilmavuodot ovat keskeinen tekijä rakennuksen terveellisyydessä ja turvallisuudessa sekä olosuhteiden hallinnassa. Kyseessä on yllättävän vähän esillä oleva ja huonosti tunnettu aihe sen tärkeyteen nähden.

5.2 Keinot painesuhteiden hallintaan

Rakennuksen painesuhteiden hallintaan löydettiin kolme keskeistä keinoa. Ensimmäinen keino on ilman hallitsemattoman liikkeen minimoiminen. Ilmatiiveyden parantaminen sekä rakennuksen ulkovaipan että sisärakenteiden osalta vähentää ilmavuotoja sekä hillitsee termisen paine-eron voimakkuutta. Tiivis ulkovaippa vähentää myös tuulen aiheuttaman paine-eron vaikutusta. Rakennuksen läpi kulkevat kuilut tulisi katkaista kerrosten välillä ilmatiiviisti, jotta termisen paine-eron aiheuttama hormivaikutus heikkenisi. Pientaloissa olisi hyvä erottaa eri kerrokset toisistaan ilmatiiviisti. Korjausrakentamisessa oleellista on myös tarkistaa vanhojen läpivientien tiiveys, sillä usein vanhat tiivistysmateriaalit ovat ajan kanssa eläneet eri tahtia ympäröivän rakenteen kanssa ja menettäneet tiivistyskykynsä.

Toinen keskeinen keino on tarjota ilmalle hallitut korvaus- ja siirtoilmareitit. Riittävän väljät siirtoilmareitit mahdollistavat ilman kulkemisen huonetilojen välillä mahdollisimman pienellä paine-erolla.

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa ja painovoimaisessa ilmanvaihdossa erityisen tärkeässä asemassa ovat korvausilmaventtiilit ja niiden riittävän väljä mitoitus. Mikäli paine-eroa vaipan yli joudutaan pitämään suurena, tulee suuri osa korvausilmasta rakenteiden läpi. Vaipan läpi asennettavia korvausilmaventtiilejä olisi hyvä harkita myös vikasietoa parantavina paine-erosulakkeina koneellisen tulo-poistoilmanvaihdon kohteissa. Ne auttaisivat pienentämään paine-eroja sekä ilmavirtoja rakenteiden läpi poikkeustilanteissa, kuten ilmanvaihtokoneen sulatussyklin aikana. Näiden tulee tarvittaessa olla ilman takaisinvirtauksen estäviä, jotta siirtoilman käyttö on mahdollista eikä tuolloin ilma karkaa venttiilistä ulos.

Kolmas keino on ilmanvaihtojärjestelmän tarkka suunnittelu, jossa huomioidaan sekä termisen paine-eron että tuulen vaikutukset. Riittävän kanavapaineen ylläpito vähentää termisen paine-eron vaikutusta tulo- ja poistoilmakanavistossa. Tuuli ja termisen paine-ero vaikuttavat myös ulkoilma- ja ulospuhalluslaitteisiin. Tämä tulisi huomioida esimerkiksi kanavistossa vakiopaine-eroa ylläpitävällä ohjausjärjestelmällä, joka säätää puhaltimien nopeutta vaikutusten kompensoimiseksi. Tiloja ali- tai ylipaineistaessa tulee painetasolle asettaa maltillinen mutta riittävä tavoite.

5.3 Painesuhteiden huomiointi korjausrakentamisen suunnittelussa

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon rakennuksen toiminta kokonaisuutena. Jotta toimivaan lopputulokseen olisi mahdollista päästä, tulee rakennus ja ilmanvaihtojärjestelmä suunnitella sellaiseksi, että painesuhteille annetaan mahdollisuus toimia oikein. Korjausrakentamisessa korostuu riittävien lähtötietojen keräämisen tärkeys. Lähtötietojen avulla voidaan asettaa eri tilojen painesuhteille tavoitteet, joilla varmistetaan rakennuksen terveellinen ja turvallinen toimivuus.

Rakennuksen painesuhteiden toimintaa tulee tarkastella eri vuodenaikoina vallitsevissa olosuhteissa. Mikäli rakennuksessa on tiloja, joita täytyy alipaineistaa tai ylipaineistaa, tulee tämä esittää selkeästi suunnitelmissa. Suunnitteluryhmän tulee myös miettiä, onko joitain tiloja tai rakenteita, jotka ovat erityisen herkkiä ilmavuodoille ja joiden painetasojen pysyvyyteen tulisi kiinnittää erityistä huomiota.

Tilojen käyttötarkoituksista johtuva kosteusrasitus tulisi huomioida ilmanvaihtosuunnittelussa ilmanjakoa miettiessä, jotta voitaisiin välttää esimerkiksi korkean kosteuskuorman tilojen ylipaineistaminen. Ilmanvaihdon suunnittelussa tulee ottaa huomioon termisen paine-eron sekä tuulen vaikutus järjestelmän toimintaan.

Erityistä huomiota vaatii koneellisen poistoilmanvaihdon suunnittelu. Korvausilmalaitteiden mitoitus tulee tehdä huolellisesti ja asettaa vaipan yli vallitsevalle paine-erolle tavoitetaso, jonka mukaan laitteet mitoitetaan. Suunnittelun yhteydessä on myös arvioitava ja mahdollisuuksien mukaan parannettava rakenteiden tiiveyttä, sillä se vaikuttaa paine-eroon jota on mahdollista ylläpitää turvallisesti ulkovaipan ylitse.

Korjaustyötä suunnitellessa tulisi myös seurantamittausjärjestelmien tarve. Muutama paine-eromittaus ulkovaipan yli ja ilmanvaihdon palvelualueiden välillä ei ole kustannuksena suuri, mutta se mahdollistaisi järjestelmien toiminnan jatkuvan tarkkailun ja auttaisi esimerkiksi arvioimaan ilmanvaihdon uudelleensäädön tarpeellisuutta.

Jotta suunnitteluratkaisut ilmanvaihdon ja rakenteiden osalta olisivat toimivia ja yhteensopivia, on suunnitteluryhmän tärkeä tehdä tiivistä yhteistyötä. Ilmanvaihtosuunnittelijan sekä rakennesuunnittelijan on keskusteltava keskenään ilmatiiveyden tasosta ja ilmanvaihtojärjestelmän asettamista vaatimuksista rakenteille, tai rakenteiden asettamista vaatimuksista ilmanvaihtojärjestelmälle.

Korjaustyön yhteydessä olisi tärkeää varmistua siitä, että rakenteet on saatu ilmatiiviiksi, ilmanvaihto säädettyä oikein ja paine-erot suunnitellulle tasolle. Tämän vuoksi ilmatiiveys tulisi mitata sekä yli- että alipaineella ja korjata mahdollisesti vuotamaan jääneet paikat. Ilmanvaihdon säädön oikeellisuus tulisi varmistaa mittaamalla paine-erot riittävällä laajuudella ulkovaipan yli.

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös rakennuksen ja järjestelmien vikasietoisuus. Rakennuksen elinkaari on pitkä ja niiden käyttäjät sekä huoltajat vaihtelevalla tietotaidolla varustettuja. Tästä syystä suunnittelussa tulisi panostaa rakennuksen helppokäyttöisyyteen sekä selkeiden käyttö- ja huolto-ohjeiden laatimiseen.

6 POHDINTA

Olin osannut varautua siihen, että opinnäytetyön aihe on laaja ja sisältää monipuolisesti ilmanvaihto-, rakenne- ja rakennusfysiikkasuunnittelun elementtejä. Aihe on kokemukseni mukaan hieman heikosti tunnettu käytännön työelämässä ja hankkeiden suunnittelussa, ja se voi johtua juuri tästä poikkitieteellisyydestä. Toivon, että työn perusteella laadittavasta ohjekortista olisi apua suunnitteluryhmän yhteistoimintaan korjauskohteita suunnitellessa.

Työn tietoperustan kerääminen ja haastattelut paransivat käsitystäni rakennuksen painesuhteista kokonaisuutena. Korjausrakentaminen on lähtökohtaisesti uudisrakentamista haastavampaa, sillä rakennukset ovat yksilöitä ja asettavat omia rajoitteitaan tehtäville toimenpiteille. Mitä tarkemmin lähtötilanne saadaan selvitettyä, sitä paremmin pystytään suunnittelemaan tarvittavat toimenpiteet hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi.

Tietoperustan kerääminen ja siinä sivussa kirjallisuuden läpikäyminen toivat vahvan käsityksen siitä, että täydellistä painesuhteiden hallintaa ei ole realistisesti mahdollista saavuttaa korjaushankkeissa. Olosuhteet ovat muuttuvia ja ilmanvaihtojärjestelmien toiminta häiriintyy herkästi asennus-, käyttö- tai säätövirheistä tai laitteiston kulumisesta. Siksi olisikin tärkeää panostaa ratkaisujen vikasietoisuuteen sekä toiminnan jatkuvaan seurantaan.

Työkokemukseni on osoittanut, ettei ole missään määrin yleistä käyttää ilmanvaihdossa paine-eroa tasaavia korvausilmaventtiilejä ”varalta”, eli silloin kun niitä ei varsinaisesti tarvita korvausilman suunniteltuna reittinä. Tämä olisi kuitenkin halpa ja hyvä ratkaisu tasaamaan häiriö- ja poikkeustilanteiden paine-eroa antamalla ilmalle turvallinen reitti kulkea rakennuksen ulkovaipan yli. Joissain tiloissa tämä vaatisi ulosvirtauksen estävää venttiiliä sekä tarkkaa siirtoilmareittien mitoittamista, jotta esimerkiksi makuuhuoneen tuloilma ei karkaisi venttiilistä ulos, vaikka sen olisi tarkoitus päätyä siirtoilmana muihin tiloihin.

Sähköpostihaastatteluissa en saanut aivan niin paljon vastauksia kuin odotin. Esitin haastattelupyynnön kolmelletoista valikoidulle asiantuntijalle, ja vastaukset sain neljältä. Vastausten vähyydestä huolimatta niistä kävi ilmi huomioita, joihin en kirjallisuuslähteissä törmännyt. Haastatteluilla oli siis myönteinen vaikutus työhön ja niitä voidaan siinä mielessä pitää onnistuneena.

Työssä löydettiin vastauksia esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Ensimmäinen tutkimuskysymys osoittautui ehkä hieman laveaksi, sillä tietoperustaa kerätessä kävi selväksi, että painesuhteiden hallinta on aina tärkeää ja iso osa rakennuksen terveellistä ja turvallista toimintaa hankkeen luonteesta riippumatta.

Jatkoselvityksen tarvetta olisi rakennuksen käyttöohjelmallin luomisessa paine-erojen hallinnan osalta. Kun rakennus on saneerattu, tulee se olemaan vuosikymmeniä käyttäjien hoivassa. Läheskään aina rakennuksen hoidosta vastaavilla tahoilla ei ole käytettävissä riittävää asiantuntemusta paine-erojen käyttäytymisen tai niiden seurausten ymmärtämiseen, joten aiheesta olisi hyvä laatia kattava ohjeistus. Rakennuksia on lukemattomia erilaisia ja kaikissa on omat yksilökohtaiset metkunsä, mutta ohjeistus olisi hyvä olla olemassa edes perustapauksille käsittäen erilaiset ilmanvaihtojärjestelmät sekä tyyppisten rakennusten tyyppillisiä ongelmia.

LÄHTEET

Air-Conditioning Engineers, Inc 2005. ASHRAE Handbook. Chapter 27: Ventilation and Infiltration. Hakupäivä 7.11.2023. <https://www.globalspec.com/reference/53625/203279/chapter-27-ventilation-and-infiltration>

Björkholtz, Dick 1987. Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy.

Björkroth, Marko & Eskola, Lari 2019. Rakennusten paine-erojen mittausohjeprojektin loppuraportti 14.10.2019. A-Insinöörit Oy ja Ympäristöministeriö.

Björkroth, Marko, Eskola, Lari, Kosonen, Risto & Vinha, Juha 2020. Sisäilmayhdistys raportti 38. Sisäilmastoseminaari 2020. Hakupäivä 13.11.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/content/download/4691/30364/>

Camfil Oy. PM1-pienhiukkaset vaara terveydelle. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.camfil.com/damdocuments/32420/727019/esite-pm1-hiukkaset-fin.pdf>

Cammelli, Stefano & Mijorski, Sergey 2016. Stack effect in high-rise buildings. A review. Hakupäivä 28.9.2023. <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201608967048447.page>

Eurovent 4/23-2018 2018. Ilmansuodattimien EN ISO 16890-luokituksen mukaisen suodatinluokanvalinta yleisilmanvaihdon sovelluksiin. Toinen painos.

Eskola, Lari & Björkroth Marko 2020. Sisäilmastoseminaari 2020: Ilmavirtojen säätö ja muita asuntoilmanvaihdon ongelmakohtia. Hakupäivä 13.11.2023. https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Sisailmastoseminaari_2020_Eskola.pdf

Finvac ry 2019. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. Hakupäivä 29.8.2023. https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas_ilmanvaihdon_mitoitukseen_muissa_kuin_asuinrakennuksissa_2019b.pdf

Hengityслиitto.fi. Sisäilman epäpuhtaudet ja hajut. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.hengityслиitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/sisailman-epapuhtaudet-ja-hajut/>

Hometalkoot.fi. Ilman mikrobisto asunnoissa, kouluissa ja päiväkodeissa. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.hometalkoot.fi/file/15895.pptx>

Hometalkoot.fi. MVOCit eli mikrobin tuottamat haihtuvat orgaaniset yhdisteet. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.hometalkoot.fi/file/15887.pptx>

Isover Oy. Kosteudenhallinta. Hakupäivä 29.8.2023. <https://www.isover.fi/artikkeli/kosteudenhallinta#123>

Jae-Hun, Jo, Ho-Tae, Seok, Myoung-Souk, Yeo & Kwang-Woo, Kim 2009. 283 Journal of Asian Architecture and Building Engineering. Simplified Prediction Method of Stack-Induced Pressure Distribution in High-rise Residential Buildings. Hakupäivä 14.11.2023. https://www.researchgate.net/publication/245440476_Simplified_Prediction_Method_of_Stack-Induced_Pressure_Distribution_in_High-rise_Residential_Buildings

Juntunen, Miina, Salmela, Anniina, Jalkanen, Kaisa, Hovi, Hanna, Wallenius, Kaisa & Hyvärinen, Anne 2022. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet asunnoissa. Pitoisuustasot, yleisimmät yhdisteet ja terveysvaikutukset. Terveystieteiden tutkimuskeskus THL. Työpöytä 5/2022 Hakupäivä 4.9.2023. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-809-5>

Jussila, Heikki 2018. Vertia Oy. Ilmativeys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 1/2018.

Kuurola, Pentti 2015. Ilmanvaihtolaitteiston aiheuttama paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.

Kähkönen, Erkki & Saarinen, Lauri 1996. Sisäilmaston kemialliset ja fysikaaliset riskitekijät ja niiden tutkiminen. Lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.duodecimlehti.fi/duo60296>

Liddament, Martin W. 1986. Air Infiltration Calculation Techniques - an Applications Guide.

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Hakupäivä 18.8.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Madigan, Michael, Bender, Kelly, Buckley, Daniel, Sattley, Matthew & Stahl, David 2015. Brock Biology of Microorganisms. Pearson.

Motiva 2023. Ilmanvaihdon eri toteutustavat. Hakupäivä 29.8.2023. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiöt_-_yhdessä_energiatohokkaasti/ilmanvaihto/ilmanvaihdon_eri_toteutustavat

Nybergh, Christina 2014. Hormivaikutuksen hallinta korkeissa asuinkerrosrakennuksissa. Diplomityö, Aalto-yliopisto.

Ojasalo, Katri, Moilanen, Teemu & Ritalahti, Jarmo 2015. Kehittämistyön menetelmät. Helsinki: Sanoma Pro.

Oulun kaupungin hallintosääntö 1.6.2023. Hakupäivä 21.8.2023. http://www.ouka.fi/c/document_library/get_file?uuid=acb35456-5a42-4722-a14f-546736fbb0af&groupId=52058.

Oulun rakennusvalvontatoimen jatkodelegointi 1.7.2021. Hakupäivä 21.8.2023. https://www.ouka.fi/c/document_library/get_file?uuid=e411f60e-3c09-465b-928b-933bb2c8fc3b&groupId=52058

Paloniitty, Sauli 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Suomen Rakennusmedia Oy.

Rakennustietosäätiö RTS 2009. RT-ohjekortti 80-10974: Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustieto Oy.

Rakennustietosäätiö RTS 2010. RT-ohjekortti LVI 38-10454. Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto. Rakennustieto Oy.

Rakennustietosäätiö RTS 2019. RT-ohjekortti 103123: Radonin torjunta. Rakennustieto Oy.

Rakennustietosäätiö RTS 2020. RT-ohjekortti 103274: Yläpohja, perustietoa. Rakennustieto Oy.

Ranta-aho, Ilari 2016. Hormivaikutuksen aiheuttamien painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa. Diplomityö, Aalto-yliopisto.

Reijula, Kari, Ahonen, Guy, Alenius, Harri, Holopainen, Rauno, Lappalainen, Sanna, Palomäki, Eero & Reiman, Marjut 2012. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012: Rakennusten kosteus- ja homeongelmat.

Salmela, Anniina ym. 2019. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2019:59. Sisäilma ja terveys: kehitys, nykytilanne, seuranta ja vertailu eri maiden sekä julkisen ja yksityisen sektorin välillä.

Sandberg, Esa 2014a. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointiteknikka osa 1. Tammerprint: Talotekniikkajulkaisut Oy.

Sandberg, Esa 2014b. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Tammerprint: Talotekniikkajulkaisut Oy.

Seppänen, Olli 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Anjalankoski: Solver palvelut Oy.

SFS-EN ISO 9972:2015 Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Siikanen, Unto 1996. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Sisäilmayhdistys ry. Hiukkasmaiset epäpuhtaudet. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Hiukkasmaiset-epapuhtaudet>

Sisäilmayhdistys ry. Kemialliset tutkimukset. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Muut-sisailmatutkimukset/Kemialliset-tutkimukset>

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015. Hakupäivä 24.10.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545#Pidm46494959192048>

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018. Hakupäivä 24.8.2023. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20181044>

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL r.y. 1984. RIL 155. Lämmön- ja kosteudeneristys. Jyväskylä: Gummerus Oy. ISBN 951-758-044-4.

Suvanto, Mari 2014. Uusia malleja työelämän kehittämiseen. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 31.8.2023. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-633-152-5>

Säteilyturvakeskus 2023. Radon Suomessa. Hakupäivä 24.8.2023. <https://stuk.fi/radon-suomessa>

Talotekniikkainfo. Ilmanvaihtojärjestelmän suunnitelmanmukaisuuden toteaminen. Hakupäivä 18.8.2023. <https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas/27-ilmanvaihtojarjestelman-suunnitelmanmukaisuuden-toteaminen>.

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos THL 2023. Pienhiukkasten vaikutusmekanismit. Hakupäivä 4.9.2023. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet/pienhiukkasten-vaikutusmekanismit>

Toimivat katot 2022 e-kirja. Kattoliitto ry. Hakupäivä 24.8.2023. https://www.kattoliitto.fi/wp-content/uploads/2022/03/Toimivat_katot_2022.pdf

Työterveyslaitos. Suomenkieliset kemikaalikortit, radon. Hakupäivä 24.8.2023. https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=1322&p_version=2

Valvira 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 1. Hakupäivä 24.10.2023. <https://valvira.fi/documents/152634019/163413488/Asumisterveysasetuksen-soveltamisohje-osa-1.pdf/8f095063-fb99-ee73-aade-06efd618fa20/Asumisterveysasetuksen-soveltamisohje-osa-1.pdf?t=1692347713569>

Valtioneuvoston asetus ammattikorkeakouluista annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta 423/2005. Hakupäivä 31.8.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2005/20050423#Pidm45843170818560>

Wallenius, Kaisa, Hovi, Hanna, Mahiout, Selma, Remes, Jouko, Rautiala, Sirpa, Jokela, Pirjo, Leino, Katri, Liukkonen, Tuula 2021. Työterveyslaitos. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyyppisissä työympäristöissä. Päästölähteet, mittausmenetelmän, pitoisuustasot ja terveysvaikutukset. Hakupäivä 4.9.2023. <https://www.julkari.fi/handle/10024/140940>

Ympäristöministeriö 2018. Painovoimainen ilmanvaihto. Opas. Hakupäivä 27.9.2023. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/PVIV-OPAS-3729E8C3_9173_4EA5_ADB9_CD33C1432A01-143101.pdf/2ab85b97-a5fd-cee7-c096-930b297a8435/PVIV-OPAS-3729E8C3_9173_4EA5_ADB9_CD33C1432A01-143101.pdf?t=1603260091107

Ympäristöministeriö 2022. Terveet tilat 2028: Rakenteiden ilmatiivyyden parantaminen. Hakupäivä 18.8.2023. <https://tilatjaterveys.fi/documents/39510712/92619288/Rakenteiden+ilmatiivyyden+parantaminen+-+Tilaajan+opas.pdf/e0ac4f46-ffd7-e752-13a0-42c10c9918a3/Rakenteiden+ilmatiivyyden+parantaminen+-+Tilaajan+opas.pdf/Rakenteiden+ilmatiivyyden+parantaminen+-+Tilaajan+opas.pdf?t=1669041641789>.

Ympäristöministeriö 2023. Terveet tilat 2028: Selvitys sisälämpötilan vaikutuksesta rakenteiden homehtumisriskiin. Ulkoseinät ja yläpohjat. Hakupäivä 24.8.2023. <https://tilatjaterveys.fi/documents/39510712/92619288/Selvitys+sis%C3%A4l%C3%A4mp%C3%B6tilan+vaikutuksesta+rakenteiden+homehtumisriskiin+-+ulkosein%C3%A4t+ja+y%C3%A4pohjat.pdf/d1134714-1e9c->

3c42-78ac-5ddfa727377e/Selvitys+sis%C3%A4l%C3%A4mp%C3%B6tilan+vaikutuksesta+rakenteiden+homehtumisriskiin+-+ulkosein%C3%A4t+ja+yli%C3%A4pohjat.pdf/Selvitys+sis%C3%A4l%C3%A4mp%C3%B6tilan+vaikutuksesta+rakenteiden+homehtumisriskiin+-+ulkosein%C3%A4t+ja+yli%C3%A4pohjat.pdf

Ympäristöministeriö ja RAFnet 2020. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. Virtaukset. Hakupäivä 18.8.2023. https://tilatjaterveys.fi/documents/39510712/102937006/Rakennusfysiikan+oppi+materiaali+insinöörinkoulutukseen_Virtaukset.pdf

Ympäristöministeriö. Rakennusmääräyskokoelma, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012.

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä 4/13. Hakupäivä 29.8.2023. <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/700001/40799>

Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 782/2017. Hakupäivä 18.8.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Hakupäivä 18.8.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Hakupäivä 18.8.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>

Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Vantaa: Hansaprint Oy. Hakupäivä 29.8.2023. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-024-8>

LIITTEET

LIITE 1: Sähköpostihaastattelujen vastaukset. Liitettä ei julkaista.