

Rakennusten kosteusvauriot ja ylllämpeneminen muuttuvassa ilmastossa – RAIL

Jukka Lahdensivu, Toni Pakkala, Jussa Pikkuvirta, Aapo Räsänen, Santtu Alastalo, Anne Karvonen, Martin Täubel, Juha Pekkanen, Miina Juntunen, Azin Velashjerdi Farahani, Juha Jokisalo, Risto Kosonen, Kirsti Jylhä, Timo Lanki, Olli Leino, Virpi Kollanus

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2023:2

tietokayttoon.fi

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:2

Rakennusten kosteusvauriot ja ylilämpeneminen muuttuvassa ilmastossa - RAIL

Jukka Lahdensivu, Toni Pakkala, Jussa Pikkuvirta, Aapo Räsänen,
Santtu Alastalo, Anne Karvonen, Martin Täubel, Juha Pekkanen,
Miina Juntunen, Azin Velashjerdi Farahani, Juha Jokisalo,
Risto Kosonen, Kirsti Jylhä, Timo Lanki, Olli Leino, Virpi Kollanus

Valtioneuvoston kanslia Helsinki 2023

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Julkaisumyynti

Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston
verkkokirjakauppa**

Statsrådets
nätbokhandel

vnjulkaisumyynti.fi

Valtioneuvoston kanslia

CC BY-ND 4.0

ISBN pdf: 978-952-383-278-7

ISSN pdf: 2342-6799

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2023

Rakennusten kosteusvauriot ja yllämpeneminen muuttuvassa ilmastossa – RAIL

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:2

Julkaisija Valtioneuvoston kanslia

Tekijät Jukka Lahdensivu, Toni Pakkala, Jussa Pikkuvirta, Aapo Räsänen, Santtu Alastalo, Anne Karvonen, Martin Täubel, Juha Pekkanen, Miina Juntunen, Azin Velashjerdi Farahani, Juha Jokisalo, Risto Kosonen, Kirsti Jylhä, Timo Lanki, Olli Leino, Virpi Kollanus

Kieli suomi **Sivumäärä** 190

Tiivistelmä

Tutkimuksessa tehtiin laskennallisia tarkasteluja ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisesta toimivuudesta nykyisessä ja projisoiduissa tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa. Lisäksi laskennallisella mallinnuksella tarkasteltiin ilmastomuutoksen vaikutuksia rakennusten yllämpenemiseen ja lämpöiihtyvyyteen. Rakennusten kosteusvaurioiden ja niihin liittyvien mikrobien yhteyttä ihmisten terveyteen tarkasteltiin kahdella systemaattisella katsauksella. Korkeiden kesäajan lämpötilojen vaikutusta terveyteen nyt ja tulevaisuudessa arvioitiin epidemiologisista sekä vaikutusarvioinnin menetelmin.

Tehtyjen tarkastelujen perusteella suurin osa Suomessa yleisesti käytössä olevista ulkoseinärakenteista pärjää myös muuttuvassa ilmastossa. Homehtumisriski nousee sellaisissa ulkoseinärakenteissa, jotka päästävät viistosadetta lävitseen, pidättävät vettä rakenteen huokosverkostossa (tiili, läpäisevä betoni) ja tuuletuksella on heikkoa.

Palvelutalojen sekä asuntojen laskennalliset ja havaitut lämpötilat nousevat korkeiksi jo nykyisessä ilmastossa. Pelkät auringonsuojauksratkaisut eivät ole riittäviä pitämään huone-lämpötiloja riittävän alhaisella tasolla, vaan sen lisäksi tarvitaan myös aktiivista jäähdytystä erityisesti helleaaltojen aikana. Jäähdytys tulisi kohdistaa rakennuksiin, joissa asuu ikäihmisiä, sillä heillä terveysriskit ovat suurimmat. Ilman lisätoimia tulevat korkeiden lämpötilojen terveyshaitat huomattavasti lisääntymään Suomessa jo lähitulevaisuudessa väestön ikääntyessä.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

Asiasanat tutkimus, tutkimustoiminta, ilmastomuutos, rakennusfysiikka, energiatehokkuus, LVI-tekniikka, kosteusvaurio, sisäilma, sisälämpötila, astma, terveyshaitta

ISBN PDF 978-952-383-278-7

ISSN PDF 2342-6799

Julkaisun osoite <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-278-7>

Byggnaders fuktskador och överhettning i ett föränderligt klimat – RAIL

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2023:2

Utgivare Statsrådets kansli

Författare Jukka Lahdensivu, Toni Pakkala, Jussa Pikkuvirta, Aapo Räsänen, Santtu Alastalo, Anne Karvonen, Martin Täubel, Juha Pekkanen, Miina Juntunen, Azin Velashjerdi Farahani, Juha Jokisalo, Risto Kosonen, Kirsti Jylhä, Timo Lanki, Olli Leino, Virpi Kollanus

Språk finska **Sidantal** 190

Referat

I utredningen gjordes beräkningar på fasadkonstruktioners byggnadsfysikaliska funktionaliteter i nuvarande samt projicerade framtida klimatscenarier. Utöver detta beräknades klimatförändringens inverkan på byggnaders överhettning och termiska komfort. Byggnaders fuktskadors och härmed samhörande mikrobverksamhets samband med människors hälsa granskades med två systematiska översikter. Höga sommartemperaturers inverkan på hälsan nu och i framtiden uppskattades med epidemiologiska metoder och konsekvensbedömning.

På basen av studierna klarar sig de för Finland typiska fasadkonstruktionerna väl även i ett föränderligt klimat. Risken för mögeltillväxt ökar i konstruktioner som är otåta mot slagregn, kvarhåller fukten i porstrukturen (tegel, genomsläpplig betong) samt vars ventilerings är bristfällig.

Servicebyggnaders och bostäders kalkylerade och observerade temperaturer uppnår höga värden redan i nuvarande klimat. Solskyddslösningarna är otillräckliga för att hålla temperaturerna tillräckligt låga. Utöver dessa måste man aktivt avkyla innetemperaturen speciellt under värmeböljor. Avkylningen bör riktas till byggnader där det bor äldre för att de har de största hälsoriskerna. Utan extra åtgärder kommer hälsoriskerna förorsakade av höga temperaturer att inom en snar framtid att öka markant i Finland då befolkningens åldras.

Klausul Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokayttoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

Nyckelord forskning, forskningsverksamhet, klimatförändring, byggnadsfysik, energieffektivitet, VVS-teknik, fuktskada, inneluft, astma, hälsorisk, sanitär olägenhet

ISBN PDF 978-952-383-278-7

ISSN PDF 2342-6799

URN-adress <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-278-7>

Moisture damage and high temperatures in buildings in changing climate - RAIL

Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2023:2

Publisher Prime Minister's Office

Authors Jukka Lahdensivu, Toni Pakkala, Jussa Pikkuvirta, Aapo Räsänen, Santtu Alastalo, Anne Karvonen, Martin Täubel, Juha Pekkanen, Miina Juntunen, Azin Velashjerdi Farahani, Juha Jokisalo, Risto Kosonen, Kirsti Jylhä, Timo Lanki, Olli Leino, Virpi Kollanus

Language Finnish

Pages

190

Abstract

Computational studies on building physical performance of external wall assemblies were made in the present and projected future climate with several climate scenarios. Also, effects of climate change on high temperatures and thermal comfort of dwellings in different building types were studied by computational modelling. Two systematic article reviews were done to study the connection between the health of the residents, the moisture damage, and the moisture damage related microbes. The effects of high temperatures in dwellings during summer period on health of the residents was studied in the present and future climate using epidemiological and impact assessment methods.

Based on the studies, most of the external wall assemblies commonly used in Finnish buildings performs satisfactory in changing climate. Risk for mould growth in external wall assemblies increases in structures, where the outer layer is permeable, i.e., wind-driven rain penetrates the outer layer, the pore structure holds water for long periods (brick, permeable concrete), and ventilation of structure is weak.

Computational and detected temperatures in assisted living facilities and dwellings are high already in the present climate. Different sun-protection solutions are not enough for keeping room temperatures sufficiently low in summertime, thus there is a need for active cooling especially during heatwaves. Cooling of dwellings is mostly needed in buildings where older people live, as the elderly are most vulnerable to adverse health effects. Without additional measures health hazards will increase in Finland already in the near future due to aging population.

Provision This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.

Keywords research, research activities, climate change, building physics, energy efficiency, HVAC, moisture damage, indoor air, asthma, health hazard

ISBN PDF 978-952-383-278-7

ISSN PDF

2342-6799

URN address <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-278-7>

Sisältö

Esipuhe	9
1 Johdanto	10
1.1 Tausta ja tavoite	10
1.2 Tavoitteet	12
1.3 Suomen rakennuskanta.....	13
1.4 Ilmastonmuutosennusteet	18
2 Tutkimusmenetelmät	21
2.1 Rakennusfysikaalinen toimivuus, tulvat ja rakenteiden vaurioituminen	21
2.2 Kosteusvaurioiden yhteys terveyteen.....	21
2.3 Rakennusten lämpöolot ja lämpöviihtyvyys	23
2.3.1 Säävuoden valinta.....	23
2.3.2 Lämpöolojen ja lämpöviihtyvyyden simulointi	25
2.3.3 Huonelämpötilojen ja lämpöviihtyvyyden tavoitearvot	26
2.4 Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat.....	26
2.4.1 Altiste-vastesuhteet.....	27
2.4.2 Vaikutusarviointi.....	28
Lämpötila-aineisto.....	29
Kuolleisuus-, sairaalakäynti- ja väestöaineisto	29
Terveysvaikutusten laskenta.....	30
Sisälämpötilojen mittausaineisto ja sisälämpötilan yhteys terveyteen	31
3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset tyypillisiin rakenteisiin ja rakennuksiin	32
3.1 Kosteusteknisten riskirakenteiden tunnistaminen	32
3.1.1 Rakennusfysikaalinen tarkastelu.....	32
Simuloidut rakenteet	32
Simuloinnissa käytetyt muuttujat ja lähtötiedot	34
Laskentavuodet	36
3.1.2 Homehtumisriskin arviointi.....	37
3.1.3 Rakenteiden homehtumisriskitarkastelun tulokset	39
Betonisandwich-rakenteet	39
Tiili-villa-tiili-rakenteet	44
Tiili-eriste-betoni-rakenteet	49
Tiili-puurunko-rakenteet.....	53
Ohutrappaus-eristejärjestelmä	58
3.1.4 Yhteenvedo rakennusfysikaalisten tarkastelujen tuloksista	59

3.2	Kosteus- ja mikrobivauriot rakennuskannassa	62
3.3	Rakenteiden säilyvyys muuttuvassa ilmastossa.....	65
3.4	Tulvien aiheuttamat riskit rakennuksille	69
3.4.1	Hulevesitulvat	69
3.4.2	Vesistötulvat	71
3.4.3	Merivesitulvat.....	73
3.4.4	Tulville alttiit rakennukset	75
4	Kosteusvaurioiden terveysvaikutukset.....	79
4.1	Kosteusvaurioiden yhteys uuden astman syntyyn	80
4.2	Kosteusvaurioon liittyvien mikrobien yhteys terveyteen.....	81
4.2.1	Bakteerit.....	82
4.2.2	Sienet	85
4.2.3	Kosteusvaurioon liittyvien mikrobitutkimusten ja niiden terveyshaittojen tarkastelua	89
5	Rakennusten lämpöolot, energiankulutus ja jäähdytyksen käyttö Suomessa	91
5.1	Simulointitapaukset.....	91
5.1.1	Vanhainkodit	92
	80-luvun vanhainkoti.....	92
	Uudisvanhainkoti	94
5.1.2	Kerrostalot	95
	70-luvun kerrostalo.....	95
	Uudiskerrostalo.....	97
5.1.3	Pientalot.....	98
	60-luvun pientalo.....	98
	Uudispientalo.....	100
5.2	Rakennukset nykyilmastossa	101
5.2.1	Huonelämpötilat	101
	Vanhainkodit	101
	Kerrostalot	105
	Pientalot	108
5.2.2	Energiankulutus	111
	Vanhainkodit	111
	Kerrostalot	113
	Pientalot	115
5.3	Rakennukset nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa	116
5.3.1	Huonelämpötilat	116
	Vanhainkodit	117
	Kerrostalot	120
	Pientalot	124

5.3.2	Lämpöihtiivyyys	127
	Vanhainkodit	127
	Kerrostalot	130
	Pientalot	133
5.3.3	Energiankulutus	135
	Vanhainkodit	136
	Kerrostalot	137
	Pientalot	138
5.4	Jäähdytettyjen rakennusten osuus Suomessa.....	139
5.4.1	Kaukojäähdytys.....	139
5.4.2	Ilmalämpöpumput	140
5.4.3	Jäähdytyksen käyttö sairaaloissa	142
6	Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat	143
6.1	Korkeiden ulkolämpötilojen aiheuttaman terveysriskin suuruus.....	143
6.1.1	Altiste-vastesuhteet	143
	Kuolleisuus.....	143
	Sairaalakäynnit.....	145
6.1.2	Vaikutusarviointi.....	148
	Nykytilanne	148
	Tulevaisuus.....	152
6.2	Sisälämpötilan yhteys ulkolämpötilaan	154
6.3	Korkeiden sisälämpötilojen terveysvaikutukset	156
6.3.1	Tutkimusnäyttö korkeiden sisälämpötilojen yhteydestä terveyshaittoihin	157
6.3.2	Korkeita sisälämpötiloja koskevat ohjeistukset.....	158
7	Päätelmät ja suositukset	161
7.1	Ilmastonmuutoksen vaikutukset tyypillisiin rakenteisiin.....	161
7.2	Kosteusvaurioiden yhteys terveyshaittoihin	163
7.3	Rakennusten ylläpöäminen	164
7.4	Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat	166
7.5	Suositukset	167
7.6	Jatkotutkimustarpeet.....	169
	Liitteet	171
	Lähteet.....	173

ESIPUHE

Rakennusten kosteusvauriot ja yllämpeneminen muuttuvassa ilmastossa, tutkijoiden keskuudessa RAIL-tutkimus, käynnistyi syksyllä 2021. Hanke kuuluu valtioneuvoston tutkimus- ja selvitystoiminnan teemaan *2.12 Ilmastomuutoksen aiheuttamien riskien kartoitus Suomen rakennuskannalle ja rakentamiselle*. Hankkeen toteutuksesta vastasi Tampereen yliopiston (TAU) vetämä konsortio, johon kuuluivat TAU:n lisäksi Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL), Aalto-yliopisto sekä Itä-Suomen yliopisto (UEF).

Hankkeessa on yhdistetty laskennallisia rakennusfysikaalisia tarkasteluja rakenteiden kosteus- ja mikrobiologisesta toiminnasta sekä lämpöviihtyvyydestä rakennusten käyttäjien terveysriskeihin. Tehdyt tarkastelut ovat tässä mittakaavassa uniikkeja ja hyödynnettävissä Suomen asuinrakennuskannan ylläpitotarpeiden arvioinnissa sekä uusien rakennusten jäähdytystarpeen arvioimisessa.

Hankkeen ohjausryhmän puheenjohtajana toimi Timo Lahti ympäristöministeriöstä. Muut ohjausryhmän jäsenet olivat Pekka Kalliomäki ympäristöministeriöstä, Mikko Helasvuo opetus- ja kulttuuriministeriöstä, Katja Outinen valtioneuvoston kansliasta, Vesa Pekkola sosiaali- ja terveysministeriöstä ja Hanna Vuorinen liikenne- ja viestintäministeriöstä. Hankkeen koko työryhmä haluaa esittää kiitokset hankkeen ohjausryhmälle.

Uusimpien maailmanlaajuisten CMIP6-ilmastomallien tuottamat vuorokauden keskilämpötilat ladattiin Earth System Grid Federation (ESGF) -tietoarkistosta (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/>) ja niiden harhankorjaukseen käytetyt eurooppalaiset E-OBS -havaintoaineistot ladattiin ECA&D -hankkeen sivustolta (<https://www.ecad.eu>). Kiitämme kaikkia kyseisiä aineistoja laatineita ilmastomallinuskuskeskuksia. Kimmo Ruosteenojaa (Ilmatieteen laitos) kiitämme ilmastomallidatan lataamisesta, analysoinnista ja harhankorjausten tekemisestä. Lopuksi kiitämme Tieteen Tietotekniikan keskusta (CSC) laskentaresursseista.

Jukka Lahdensivu
Tampereen yliopisto, hankkeen vastuullinen johtaja

1 Johdanto

1.1 Tausta ja tavoite

Globaalin ilmastonmuutoksen seurauksena ilmasto on lämmennyt Suomessakin noin kaksi astetta viimeisen sadan vuoden aikana (Ilmasto-opas 2021). Ilmatieteen laitoksen laatimien ennusteiden mukaan lämpötilan nousun seurauksena Suomen ilmasto lämpeenee erityisesti talvisin (Ruosteenoja ym. 2016a; Ruosteenoja & Jylhä 2021). Ilmastonmuutoksen seurauksena sääälle alttiiden rakenteiden, kuten julkisivujen parvekkeiden ja vesikatkojen saama viistosaderasitus aiheuttaa näille rakenteille merkittävää korjaustarvetta nykyisessä rakennuskannassa, koska vanhojen rakenteiden säilyvyysominaisuudet ovat usein puutteellisia (Lahdensivu 2012). Myös kosteus- ja mikrobivaurioiden ennakoitaan lisääntyvän kohoavan kosteuspitoisuuden seurauksena (Vinha ym. 2013). Rakennusten kosteus- ja mikrobivauriot ovat yksi viidestä keskeisestä ilmastonmuutoksen aiheuttamasta terveysuhasta (Tuomenvirta ym. 2018). Nykyisen rakennuskannan kosteusvaurioiden korjaamisen on arvioitu olevan 30 miljardia euroa (Reijula ym. 2012).

Ilmastonmuutoksen myötä rakennusten kosteusvaurioiden odotetaan pahenevan viistosateiden ja tulvien lisääntymisen vuoksi. Myös energiatehokkuuden parantaminen muuttamalla lämmöneristystä ja rakennusten ilmanvaihtoa vaikuttaa kosteusvaurioriskiin (Vinha ym. 2013, Leivo ym. 2019). Rakenteiden tiettyntyyppisten kosteusongelmien odotetaan yleistyvän pääasiassa rakennusten julkisivussa (sade, tuuli) ja kellareissa (tulvat) (Pakkala ym. 2016, Pakkala 2020, Vinha ym. 2013). Suurin osa, mutta eivät kaikki (Pakkala 2020), aiemmista tutkimuksista ovat keskittyneet ilmastonmuutoksen vaikutuksiin uusiin rakennuksiin, eikä missään aiemmassa tutkimuksessa ole tutkittu vaikutuksia olemassa olevien rakennusten seinärakenteiden sisäosiin.

Epidemiologisissa tutkimuksissa rakennusten kosteusvaurioiden ja homeen on yhdenmukaisesti osoitettu olevan yhteydessä astmaoireiden pahenemiseen, ja uuden astman kehittymiseen (IOM 2004, WHO 2009, Mendell ym. 2011). Kosteusvaurioihin on liitetty myös muiden oireiden lisääntymistä ja viihtyvyyshaittoja, mutta tutkimustieto niistä on heikompaa (Käypä hoito 2017). Tutkimuksissa on havaittu, että kosteusvaurio erityisesti oleskelutiloissa, joissa vietetään suurin osa ajasta kuten keittiössä, olo- ja makuuhuoneissa), on yhteydessä astmaan (Karvonen ym. 2015, Pekkanen ym. 2007). Systemaattiseen katsaukseen ja meta-analyysiin perustuvassa arvioissa rakennuksessa havaitun näkyvän homeen tai homeen hajun on arvioitu lisäävän uuden astman riskiä 1,5-kertaisesti (Quansah ym. 2012).

Kosteusvaurioiden terveyshaitat ovat todennäköisesti ainakin osittain yhteydessä bakteerien ja sienten (homeet ja hiivat) altistuksen muutokseen (WHO 2009, Mendel & Adams 2019). Rakennusten kosteusvauriot nostavat mikrobitasoja (Jayaprakashet ym. 2017). Useimmissa julkaisuissa on tutkittu joko mikrobien tai kosteusvaurion yhteyttä terveyshaittoihin, mutta vain yksittäisissä tutkimuksissa on katsottu kosteusvaurioon liittyvien mikrobien yhteyttä terveyshaittoihin (Adams ym. 2021, Dannemiller ym. 2014). Tutkimusten perusteella ei olekaan voitu osoittaa kosteusvaurioiden ja terveyshaittojen välistä kausaalisuutta, koska tietomme altisteista tai niiden biologisista vaikutuksista tai annosvasteesta ei ole riittävää (WHO 2009, Käypä hoito 2017, Mendel & Adams 2019). Ilmastonmuutoksen aiheuttamien kosteus- ja mikrobivaurioiden lisääntymistä sekä niistä aiheutuvia terveyshaittoja tutkitaan 02/2021 alkaneessa Suomen Akatemian rahoittamassa BALANCE-hankkeessa, jota koordinoi Helsingin yliopisto. Muut konsortion osapuolet ovat TAU, THL ja Oulun yliopisto.

Ilmastonmuutoksen seurauksena rakennusten yllämpenemisen ennakoidaan lisääntyvän merkittävästi (Vinha ym. 2013, Velashjerdi Farahani ym. 2021a, Velashjerdi Farahani ym. 2021b). Jo nykyisessäkin ilmastossa pitkittyneen hellejakson aikana rakennusten sisälämpötila voi ylittää sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen toimenpiderajat 30 °C (vanhainkodit ja palvelutalot) ja 32 °C (asunnot). Ilmastonmuutoksen seurauksena toimenpiderajan ylittävien astetuntien määrän ennakoidaan moninkertaistuvan rakennuksissa, joita ei ole varustettu koneellisella jäähdytyksellä (Velashjerdi Farahani ym. 2021a).

Ulkoilman korkea lämpötila on yhteydessä niin lisääntyneeseen päivittäiseen kuolleisuuteen kuin sairastuvuuteenkin. Kesäajan korkeat lämpötilat aiheuttavat myös Suomessa vakavia terveyshaittoja huolimatta viileästä ilmastostamme. Pitkittynyt helleaalto voi aiheuttaa useampia satoja ennenaikaisia kuolemia (Kollanus & Lanki 2014). Altistuminen kuumuudelle tapahtuu pääasiassa sisätiloissa rakennusten lämmitessä: riski tälle kasvaa ilmastonmuutoksen myötä. Sisälämpötilojen yhteys terveyteen tunnetaan kuitenkin vajaaisesti. Epäselvää on siten myös, kuinka paljon terveyshaittoja esiintyy nykyisiä kansallisia sisälämpötilan toimenpiderajoja alemmissa lämpötiloissa. Kesäajan päivittäisten lämpötilojen kohoamista voidaan joka tapauksessa pitää ilmastonmuutoksen tärkeimpänä rakennusten käyttäjille aiheuttamana riskitekijänä, kun huomioidaan terveyshaittojen vakavuus.

Kuumuus ei aiheuta vakavia terveyshaittoja vain erilaisten lämpösairauksien kautta, vaan ennen kaikkea pahentamalla monia kroonisia sairauksia. Kuumuuden vakaville terveyshaitoille erityisen herkkiä ovat kroonisesti sairaiden lisäksi ikääntyneet ja pienet lapset. Ilmastonmuutokseen sopeutumisen toimet on syytä kohdentaa erityisesti riskiryhmiin (Juhola ym. 2020). UEF ja THL ovat jo pidempään selvittäneet kesäajan korkeiden lämpötilojen yhteyttä suomalaisten kuolleisuuteen ja terveyteen (esim. de Donato ym. 2015, Kollanus ym. 2021, Sohail ym. 2020). Helteen terveyshaittoja ja niiden torjumista tutkitaan parhaillaan

Suomen Akatemian rahoittamassa HEATCLIM-hankkeessa (<https://sites.uef.fi/heatclim/>), jota UEF koordinoi ja jossa ovat mukana myös THL, Aalto-yliopisto ja Ilmatieteen laitos.

Tämä hanke on jatkumoa ympäristöministeriön rahoittamille RASMI – Energialaskennan testivuodet (Jylhä ym. 2020) ja RAMI – Rakentamisen mitoitussäät (Laukkarinen ym. 2022) -tutkimushankkeille.

1.2 Tavoitteet

Hankkeella on viisi keskeistä tavoitetta: 1) selvittää ilmastonmuutoksen seurauksena nykyiseen rakennuskantaan aiheutuvaa erilaisten rakennusten ja rakenteiden vaurioitumista Suomessa, 2) selvittää kosteus- ja mikrobivaurioiden vaikutuksia rakennusten käyttäjien terveyteen, 3) selvittää ilmastonmuutoksen vaikutuksia jäähdyttämättömien rakennusten lämpötilojen nousuun ja lämpöviihtyisyyteen, 4) selvittää sisätilojen lämpötilan nousun vaikutuksia rakennusten käyttäjien terveyteen ja 5) tarkastella ratkaisupolkuja rakennusteknisten ja terveydellisten riskien pienentämiseen. Tutkimus jaetaan viiteen työpakettiin kuvan 1.1 mukaan.

Kuva 1.1 Tutkimuksen osa-alueet työpaketeittain.



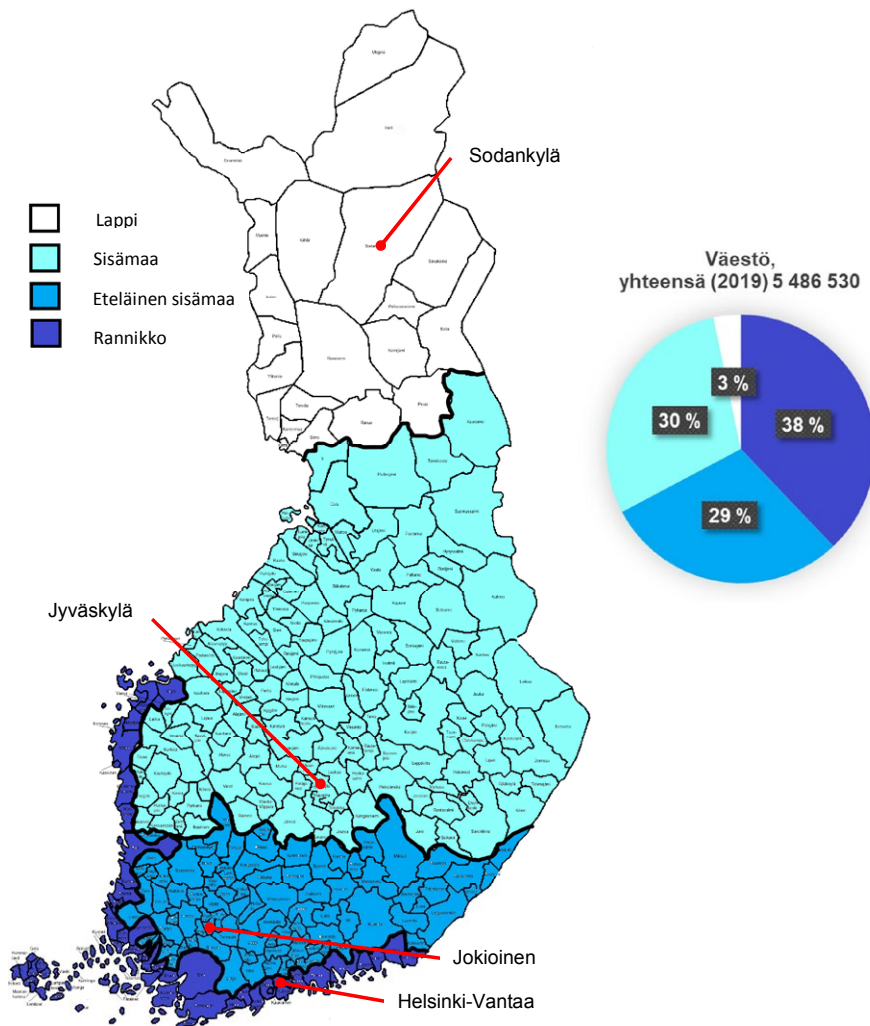
Tarkastelut tehdään kolmelle eri rakennustyyppille: asuinkerrostalo, vanhusten palvelutalo sekä pientalo. Tarkasteltavat rakenteet valitaan siten, että ne mahdollisimman hyvin edustavat Suomen nykyistä rakennuskantaa. Yliämpötilatarkasteluja ja niiden torjuntakeinoja tarkastellaan pahimmissa tapauksissa eri rakennustyypeillä. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat erilaisia Suomen eri osissa, joten viistosade- ja tulvatarkastelut tehdään erikseen rannikkoalueelle ja sisämaahan.

1.3 Suomen rakennuskanta

Eurooppalaisittain tarkasteltuna Suomen rakennuskanta on varsin nuorta, noin 70 % siitä on rakennettu toisen maailmasodan jälkeen. Suomen rakennuskannan arvoksi on arvioitu 500 miljardia euroa, ja rakennuskantaan on sitoutunut noin 45 % Suomen kansallisvarallisuudesta. (ROTI 2021) Rakentamisen liikevaihto vuonna 2020 oli 36,9 miljardia euroa, josta uudisrakentamisen osuus oli 15,9 miljardia euroa, korjausrakentamisen 14,0 miljardia euroa ja maa- ja vesirakentamisen 7,0 miljardia euroa (Vihmo 2021). Valtaosa Suomen rakennuskannasta on 30–60 vuoden ikäistä, eli peruskorjaustarve on joko ensimmäistä tai jo toista kertaa ajankohtaista.

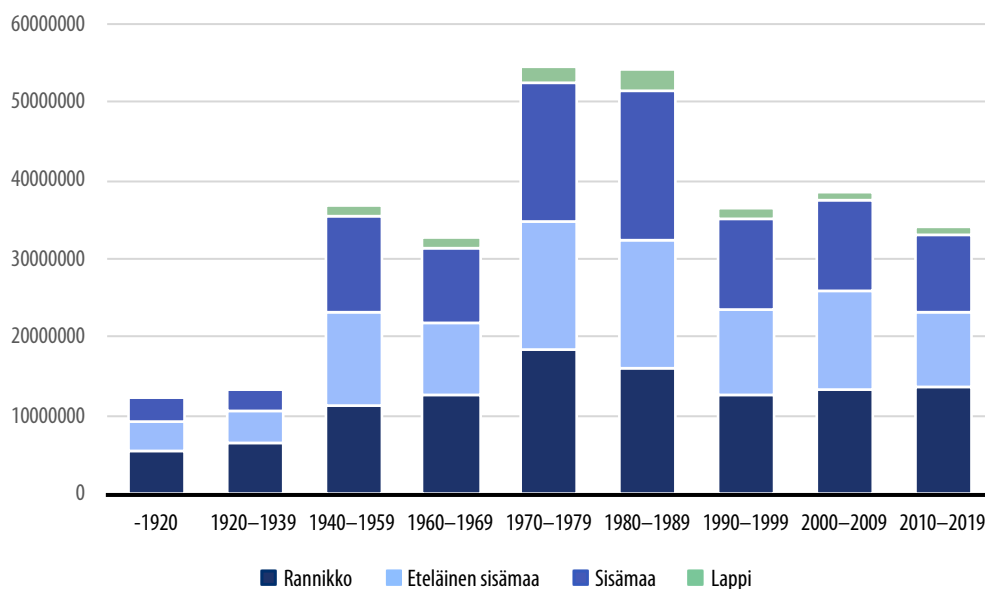
Suomi voidaan jakaa ilmastorasituksen ja väestön jakauman perusteella neljään osaan: rannikko, eteläinen sisämaa, sisämaa ja Lappi, ks. kuva 1.2. Väestö jakaantuu rannikkoalueen, eteläisen sisämaan ja sisämaan kesken melko tasaisesti, mutta Lappi poikkeaa niistä merkittävästi, sillä siellä asuu vain noin 3 % väestöstä ja vastaavasti rakennuskannastakin siellä sijaitsee vain vähäinen osuus. Lappi on kuitenkin tutkimuksessa erillisenä alueena sen selkeästi sisämaasta eroavan ilmastorasituksen vuoksi. (Pakkala 2020)

Kuva 1.2 Suomi jaettuna neljään alueeseen ilmaston ja väestön jakauman perusteella. Punaisella karttaan merkatut pisteet ovat sääasemia, joita on käytetty tässä kuvaamaan kunkin alueen olosuhteita. (muokattu lähteestä Pakkala 2020)



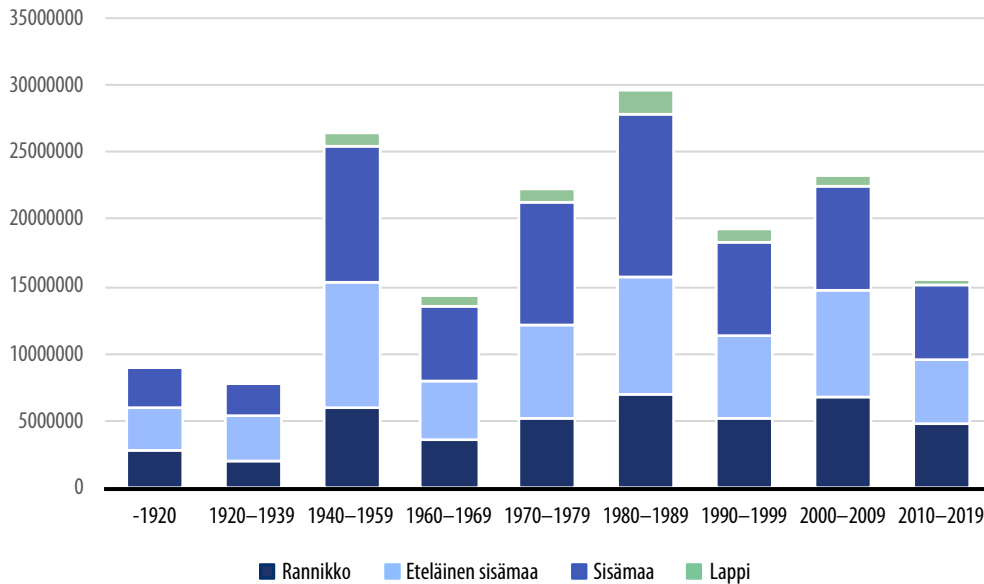
Seuraavissa kuvissa on esitetty vuoden 2020 alussa käytössä olleiden asuinrakennusten kerrosalat jaettuna Tilastokeskuksen tilastojen mukaisiin ajanjaksoihin ja jaoteltuna kuvan 1.2 mukaisella jaolla rannikkoon, eteläiseen sisämaahan, sisämaahan ja Lappiin on esitetty kuvissa alla. Kuvassa 1.3 on esitetty kaikkien asuinrakennusten, kuvassa 1.4 pien- ja erillistalojen, kuvassa 1.5 rivitalojen, kuvassa 1.6 kerrostalojen sekä kuvassa 1.7 asuntoloiden ja erikoisryhmien asuinrakennusten jakautuminen. (Tilastokeskus 2022)

Kuva 1.3 Kaikkien käytössä olevien asuinrakennusten kerrosalat (m²) Tilastokeskuksen tarkastelujaksojen sekä sijainnin mukaan jaettuna. (Tilastokeskus 2022)



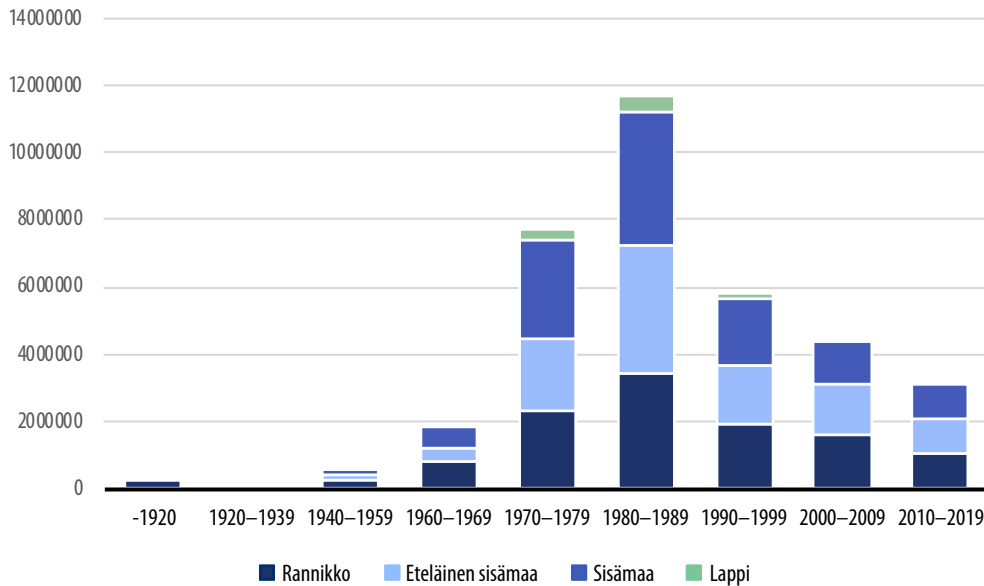
Niin kerrosalana kuin määrällisestikin merkittävimmät vuosikymmenet asuinrakentamisen kannalta ovat olleet 1970- ja 1980-luvut, jolloin on rakennettu käytössä olevien asuinrakennusten kerrosalasta 34 % ja lukumäärästä 30 %. Viimeisinä kolmena vuosikymmenä rakentamisen määrä on ollut tasaisesti 11...12 % kerrosalasta. Toisen maailmansodan jälkeen oli voimakas jälleenrakentamisen vaihe, jolloin rakennettiin määrällisesti lähes huippuvuosikymmenten tasolla, mutta rakennukset olivat lähinnä pientaloja, minkä vuoksi kerrosalana niiden osuus ei ole yhtä merkittävä. Vuosikymmenten osuus rakentamisen määrässä on jakautunut sijainneittain melko tasaisesti, mutta rannikkoalueen osuus on viime vuosikymmeninä kasvanut johtuen siihen pääosin kuuluvan pääkaupunkiseudun väestömäärän kasvusta ja vastaavasti sisämaan väestön vähenemisestä.

Kuva 1.4 Käytössä olevien omakoti- ja paritalojen kerrosalat (m²) Tilastokeskuksen tarkastelujaksojen sekä sijainnin mukaan jaettuna. (Tilastokeskus 2022)



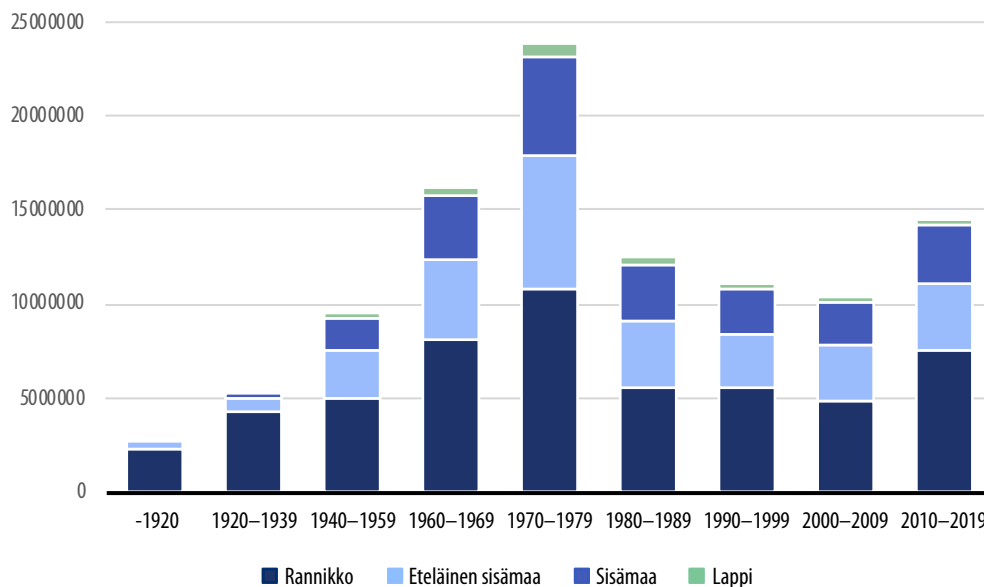
Omakoti- ja paritaloissa ennen vuotta 1960 rakennettujen rakennusten osuus on edelleen hyvin suuri erityisesti lukumäärällisesti (33 %). Yksittäisten rakennusten kerrosalat ovat sen jälkeen kasvaneet huomattavasti, minkä vuoksi myös erityisesti 1980-luku erottuu tilastoissa. Kyseisissä vanhoissa rakennuksissa on useita mahdollisia riskirakennetarkaisuja, kuten yläpohjan, alapohjan ja ulkoseinien heikko tuulettuminen, salaojituksen puuttumisesta aiheutuvat ongelmat tai väärin toteutetut korjaustoimet pitkän historian aikana. 1970- ja 1980-luvuilla on puolestaan käytetty tunnetuista riskirakenteista muun muassa valesokkeleita, tuulettumattomia kuorimuuritarkaisuja sekä huonosti toteutettuja tasakatkoja.

Kuva 1.5 Käytössä olevien rivitalojen kerrosalat (m²) Tilastokeskuksen tarkastelujaksojen sekä sijainnin mukaan jaettuna. (Tilastokeskus 2022)



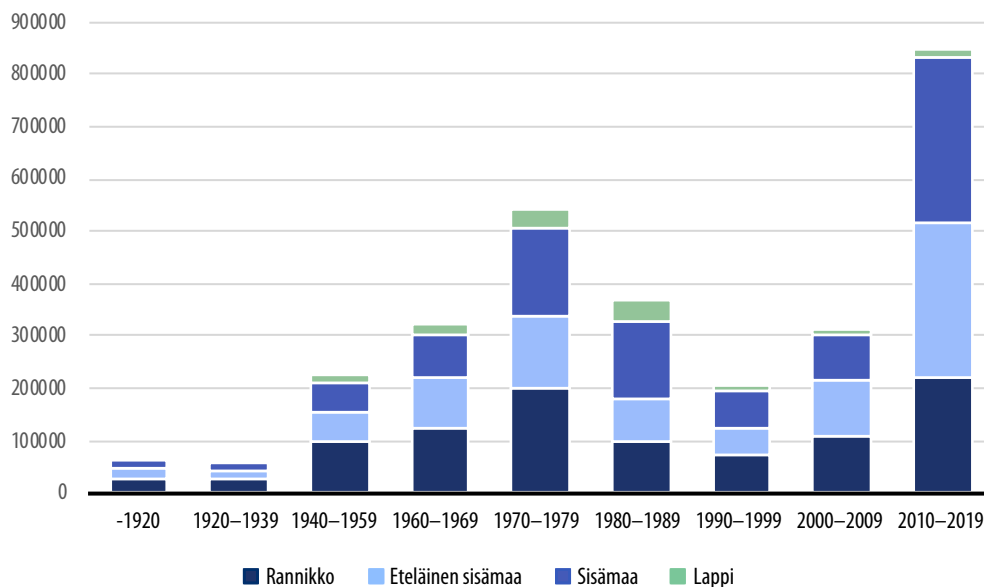
Rivitalojen määrä alkoi lisääntyä voimakkaasti hieman kerrostalorakentamisen kiihtymisen perässä 1970-luvulla, kun teollistumisen myötä kaupunkeihin tarvittiin nopeasti lisää asuntoja. Rivitaloissa korostuvat vuosikymmenet, jolloin käytettiin nyt tiedossa olevia riskirakenteita, kuten valesokkelia, tuulettumatonta kuorimuuria ja tasakattoratkaisuja.

Kuva 1.6 Käytössä olevien kerrostalojen kerrosalat (m²) Tilastokeskuksen tarkastelujaksojen sekä sijainnin mukaan jaettuna. (Tilastokeskus 2022)



Kerrostalorakentaminen kiihtyi 1960-luvun lopulla ja saavutti huippunsa 1970-luvulla rakentamisen nopeuduttua merkittävästi elementtitekniikan myötä. 1970-luvulla onkin rakennettu käytössä olevista kerrostaloista joka viides. Ennen elementtirakentamista tyyppinen kerrostalon julkisivurakenne oli puhtaaksimuurattu tiili tai rapattu tiilimuuraus, mutta 1970-luvun jälkeen rakenne, betonisandwich-elementti, on pysynyt melko samanlaisena näihin päiviin asti, joskin materiaalit ovat kehittyneet ja eristepaksuudet kasvaneet.

Kuva 1.7 Käytössä olevien asuntoloiden ja erikoisryhmien asuinrakennusten kerrosalat (m²) Tilastokeskuksen tarkastelujaksojen sekä sijainnin mukaan jaettuna. (Tilastokeskus 2022)



Asuntoloita ja erityisryhmien asuinrakennuksia on rakennettu huomattavasti kiihtyvällä tahdilla viime vuosikymmenellä pääasiassa väestön ikääntymisen vuoksi. Käytetyt rakennustyyppit ovat käytännössä kerrostalo- ja rivitalorakentamista vastaavia.

1.4 Ilmastonmuutosennusteet

Tämä tutkimus on jatkoa RASMI- (Jylhä ym. 2020) ja RAMI-tutkimushankkeille (Laukkarinen ym. 2022) ja siten tutkimuksessa on hyödynnetty kyseisissä hankkeissa muodostettuja aineistoja sekä toteutettuja tarkasteluja. Laskennan lähtötietoina on käytetty Ilmatieteen laitoksen RASMI-hankkeessa tuottamaa aineistoa, johon kuuluu kerätty säädata nykyilmastossa (vuodet 1989–2018) sekä 30-vuotiset ennusteet kolmella eri ilmastonmuutoskenaariolla tulevaisuuden ilmastoon: 2015–2046

(nimetty keskikohtansa mukaan: 2030), 2035–2064 (2050) ja 2065–2094 (2080).

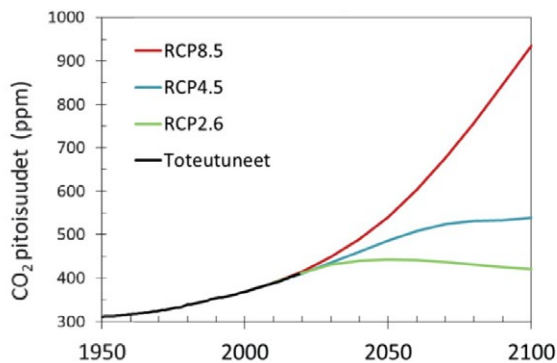
RCP -skenaarioista (Representative Concentration Pathways):

- RCP2.6 kuvaa vähäistä ilmastonmuutosta, jossa globaalit hiilidioksidipäästöt kääntyisivät laskuun noin vuonna 2020
- RCP4.5 kuvaa kohtalaista ilmastonmuutosta, jossa globaalit hiilidioksidipäästöt kääntyisivät laskuun noin vuonna 2040
- RCP8.5 kuvaa hyvin voimakasta ilmastonmuutosta, jossa globaalit hiilidioksidipäästöt eivät käänny laskuun vielä vuoteen 2100 mennessä. (Jylhä ym. 2020)

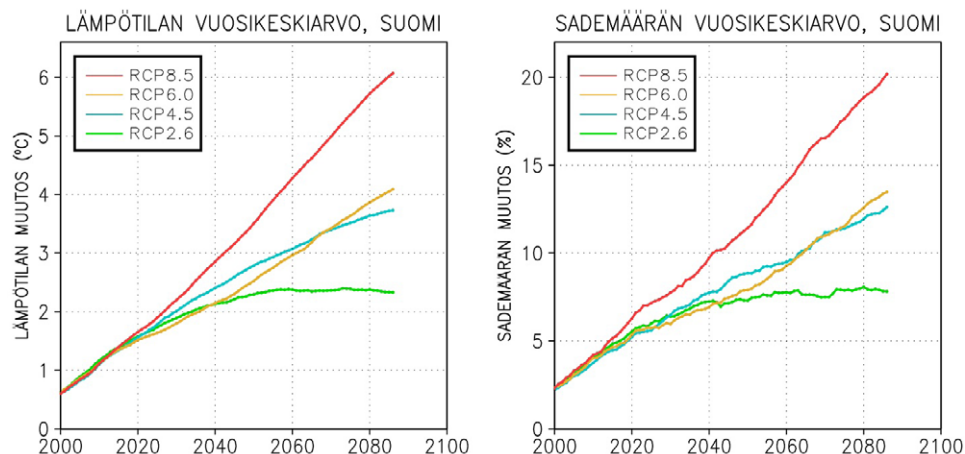
Kuvassa 1.8 on esitetty käytettyjen eri skenaarioiden mukainen ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvu, ja kuvassa 1.9 kyseiseen kasvuun perustuvat ennusteet lämpötilan ja sademäärän vuosikeskiarvojen muutoksista.

Kuva 1.8 Hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä kolmen RCP-skenaarion mukaan.

Musta käyrä esittää havaittuja pitoisuuksia. (IPCC 2013, Jylhä ym. 2020 mukaan)



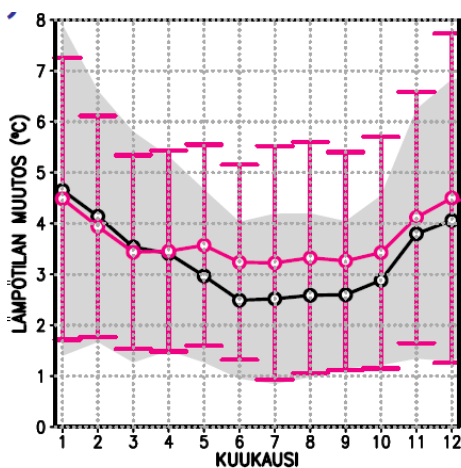
Kuva 1.9 Vuoden keskilämpötilan (vasen kuva) ja sademäärän (oikea kuva) muutos Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1971–2000 keskimääriin arvoihin. Käyrät esittävät 28 maailmanlaajuisen ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvoa neljälle eri RCP-kasvihuonekaasuskenaariolle. (Ruosteenoja 2013)



Ilmastonmuutoskenaarioihin perustuvaan laskentaan ja siten niistä tehtäviin tulkintoihin liittyy useita epävarmuustekijöitä, kuten skenaarioiden riippuvuus globaalista kasvihuonepäästökertymästä sekä skenaarioiden pohjalla käytettyjen ilmastomallien eroista. Ilmastonmuutoskenaarioiden epävarmuustekijöitä on käsitelty tarkemmin RASMI- ja RAMI-hankkeiden (Jylhä ym. 2020, Laukkarinen ym. 2022) loppuraporteissa.

Korkeiden lämpötilojen terveyshaittojen laskenta ei ole suoraa jatkumoa RASMI- ja RAMI-hankkeille, joten lähtökohdaksi tulevaisuuden terveysvaikutusten laskentaan voitiin ottaa uusimmat ilmastomallisukupolveen perustuvat ennusteet. Näistä hankkeesta käytettiin kasvihuonekaasujen skenaarioita SSP1-2.6, SSP2-4.5 ja SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways), jotka karkeasti vastaavat RCP-skenaarioita 2.6, 4.5 ja 8.5. Osa uusista malleista ennustaa kuitenkin kesäkuukausien lämpenevän Suomessa aiemmin arvioitua enemmän, ks. kuva 1.10. (Ilmatieteen laitos 2022)

Kuva 1.10 Ilmastomallien ennustama Suomen kuukausikeskilämpötilojen muutos (°C) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2070–2099. Värillinen käyrä esittää 28 uuden sukupolven mallin tuottamien muutosten keskiarvoa ja pystyjanat muutoksen 90 %:n epävarmuusväliä. Vastaavat aiempiin malleihin perustuvat muutosarviot on esitetty mustalla viivalla ja harmaalla varjostuksella. Uusien laskelmien pohjana on käytetty ”keskitasoista” SSP2-4.5-kasvihuonekaasuskenaariota, jonka toteutuessa maapallon keskilämpötila olisi vuosina 2081–2100 arviolta 2,7 °C korkeampi kuin ennen teollistumisen aikaa. Aiempien muutosarvioiden taustalla oleva ns. RCP4.5-kasvihuonekaasuskenaario on vastaavanlainen (Ilmatieteen laitos 2022; Ruosteenoja & Jylhä 2021)).



2 Tutkimusmenetelmät

2.1 Rakennusfysikaalinen toimivuus, tulvat ja rakenteiden vaurioituminen

Ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalista toimivuutta arvioitiin laskennallisesti Wufi-ohjelmistolla. Rakenteiden kosteus- ja mikrobivaurioitumisen riskiä arvioitiin laskentatulosten perusteella Suomalaisen homemallin avulla. Laskennalliset tarkastelut tehtiin nykyilmastolla sekä RCP2.6-, RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoilla.

Tulvista aiheutuvia rakennusten kastumisia arvioitiin Suomessa tunnistettujen tulvariski-alueiden sekä kaupunkitulvien riskialueiden avulla. Arviointi perustuu tulvimisen todennäköisyyteen rannikon tulvariskialueilla sekä kokonaissademäärän kasvuun suurimpien kaupunkien rankkasadetulva-alueilla sekä näillä alueilla sijaitsevien rakennusten tyyppiin ja määrään. Eri tulvatyyppien muutosta ilmastonmuutoksen vaikutuksesta arvioitiin tulvakarttapalvelun (Tulvakeskus 2022), kokonaissademäärän muutoksen sekä aikaisempien tutkimusten perusteella (Kahma ym. 2014, Lehtonen ym. 2014, Mäkelä ym. 2016, Parjanne & Huokuna 2014, Parjanne ym. 2018, Pellikka ym. 2018, Toivonen ym. 2021, Veijalainen ym. 2012).

Olemassa olevien betonijulkisivujen ja -parvekkeiden säilyvyysominaisuuksia, vaurioitumista sekä ilmastonmuutoksen aiheuttamaa vaurioitumisen lisäystä on tutkittu perusteellisesti Lahdensivun (2012) ja Pakkalan (2020) väitöstutkimuksissa. Tässä tutkimuksessa referoitiin em. tutkimuksia sekä arvioitiin ilmastonmuutoskenaarioiden ja kirjallisuuden perusteella muiden säälle alttiiden julkisivujen säilyvyyttä ilmaston muuttuessa.

2.2 Kosteusvaurioiden yhteys terveyteen

Rakennusten kosteusvaurioiden ja niihin liittyvien mikrobialtisteiden aiheuttamiin terveyshaittoihin on tehty kaksi systemaattista kirjallisuustiedon hakua. Kirjallisuustiedon ja rakenteiden laskennallisten tarkastelujen perusteella on arvioitu ilmastonmuutoksen vaikutuksia terveyteen.

Raportissa esitetään tuloksia kahdesta systemaattisesta kirjallisuuskatsauksesta, jossa ensimmäisessä tarkasteltiin kosteusvaurioiden vaikutusta uuden astman sairastuvuuteen (luku 4.1) ja toisessa kosteusvaurioihin liittyvien mikrobien yhteyttä terveyteen (luku 4.2).

Kosteusvaurioon ja astmaan liittyvässä systemaattisen kirjallisuuden tiedonhaussa saatiin PubMed-haulla 1 748 julkaisua, jotka kaksi tutkijaa kävi itsenäisesti läpi otsikkotasolla. Näistä julkaisuista 411 luettiin joko vähintään tiivistelmätasolla tai kokonaan. Etukäteen päätettyjen valintakriteerien perusteella mukaan valittiin 30 kansainvälistä vertaisarvioitua artikkelia 21 eri tutkimuksesta (Liitetaulukko 1). Valintakriteereinä olivat seuraavat ehdot: tutkittuina oli yli 10 rakennusta JA ne olivat pitkittäistutkimuksia, jossa ulkopuolinen tarkastaja/tutkija tai tutkittava itse/vanhempi raportoi kosteusvauriosta ennen astmaan sairastumista TAI ne olivat tapaus-verrokkitutkimuksia, jossa ulkopuolinen tarkastaja/tutkija raportoi kosteusvauriosta. Astman vaihtoehtoisia määritelmiä oli kolme: 1) lääkärin diagnosoima astma tai kaksi lääkärin diagnosoimaa astmaattista/ahtauttavaa bronkiittia; TAI 2) astmaan liittyviä hengitystieoireita yhdistettynä positiiviseen bronkodilataatiotestiin tai metakoliinitestiin; TAI 3) alle kolmivuotiailla vähintään kaksi raportoitua hengityksen vinkunaa. Tutkimuksia, joissa kosteusvaurio oli määritelty perustuen pelkästään mikrobimittauksiin, ei otettu mukaan tähän katsaukseen.

Käytetty PubMed-hakutermit oli kosteusvaurioasioissa: *mould, mold, fung*, mildew, damp*, moist*, water damage**, terveysasioissa: *asthma, wheez*, rhinitis, cough, bronchitis, lung function, respir*, allerg**, ja rakennusasioissa: *home, resid*, dwelling, hous*, day care*, building, office, school*. Hakusanojen tuli esiintyä julkaisun otsikossa tai tiivistelmässä. Lisäksi hauissa rajauduttiin vain englanninkielisiin ja ihmistutkimuksiin (only English, only Humans).

Toisessa systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa selvitimme kosteusvaurioon liittyvien mikrobien yhteyttä terveyshaittoihin. Katsaukseen valittiin kaikki julkaisut, joissa oli tutkittu kosteusvaurion yhteyttä eri mikrobeihin sekä mikrobien yhteyttä terveyteen. Tässä katsauksessa käytämme termiä 'kosteusvaurio' kuvastamaan mitä tahansa tutkimuksissa käytettyä kosteusvaurioidikaattorin yhteyttä tutkittuihin mikrobeihin. PubMed-haulla löysimme 1 007 julkaisua, joita kaksi tutkijaa kävi läpi vähintään otsikkotasolla ja 67 julkaisusta luettiin koko artikkeli läpi. Näiden julkaisujen lisäksi löydettiin 4 julkaisua eri julkaisujen viiteluetteloista, jotka eivät olleet mukana PubMed-hakuosumassa. Katsaukseen valittiin 39 julkaisua (Liitetaulukko 2) etukäteen päätettyjen kriteerien mukaan. Valintakriteerien mukaan tutkimushankkeesta piti olla julkaistuna (ei välttämättä kyseisessä julkaisussa) yhteys 1) kosteusvaurion ja mikrobin/mikrobien välillä, JA 2) kosteusvaurioon liittyvien mikrobien ja terveyden (oire/sairaus/mittaus kuten esim. FeNO tai spirometria) välillä. Itse raportoidut tai tutkijan havaitsemat kosteusvauriot hyväksyttiin, mutta tutkimusasetelmista rajattiin pois alle 5 rakennusta käsittävät tutkimukset. Mukaan otetut tutkimukset olivat pitkittäisiä, poikkileikkaus-, retrospektiivisiä, tai tapaus-verrokkitutkimuksia. Tutkimusten piti olla tehty ihmisille eikä *in vitro* -tutkimuksia otettu mukaan. Katsauksen ulkopuolelle jätettiin erilaiset pölystä tai ilmasta mitattavat allergeenit sekä mikrobien haihtuvat aineenvaihdunnan tuotteet (MVOC ja toksiinit), koska katsauksessa haluttiin erityisesti selvittää, mitkä mikrobit selittävät kosteusvaurion ja terveyshaitan (oire, sairaus tai

mittaustulos) välisen yhteyden. Katsauksessa raportoidaan mikrobin ja terveyden välisiä tuloksia vain niistä mikrobeista, joista oli havaittu positiivinen yhteys kosteusvaurion ja mikrobin välillä.

Käytetty PubMed-hakutermitö oli terveysasioissa: *asthma, wheez*, allerg*, respir*, symptom*, inflammation, disease, rhinitis, cough, bronchitis*, mikrobiasioissa: *Fung*, Bacteria*, Microb**, rakennusasioissa: *indoor, "residence, school*", daycare, office, "built environment", building, home*, house**, ja kosteusvaurioasioissa: *"moisture damage*", moisture-damage*, mold*, mould*, damp*, "water damage*", water-damage*, odor*, odour*, mildew, moist**. Hakusanojen tuli esiintyä julkaisun otsikossa tai tiivistelmässä. Lisäksi hauissa rajauduttiin vain englanninkielisiin ja ihmistutkimuksiin (only English, only Humans).

2.3 Rakennusten lämpöolot ja lämpöviihtyvyys

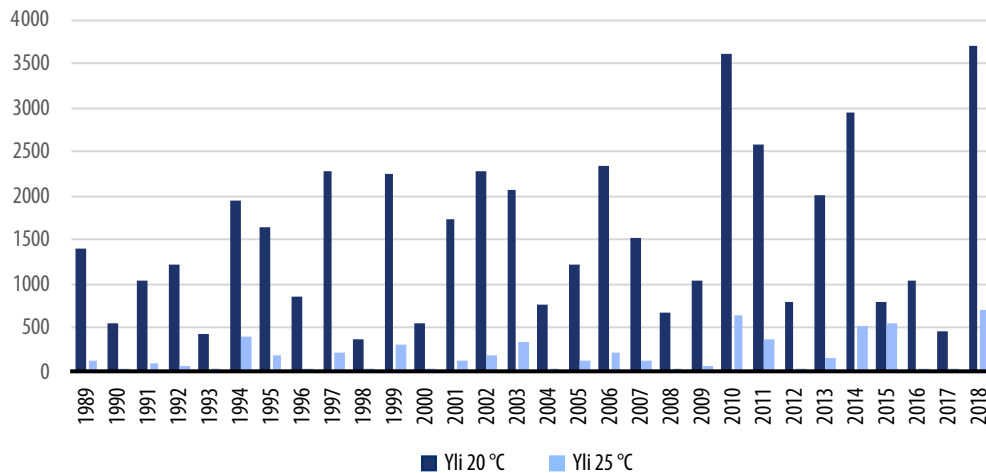
2.3.1 Säävuoden valinta

Rakennusten lämpöoloihin ja lämpöviihtyvyyteen liittyvässä tutkimusosiossa käytetään Suomen säävyöhykkeellä I (Ympäristöministeriö 2017) mitattua säähavaintoaineistoa, koska rakennusten yllämpenemisriskin arvioidaan olevan Etelä- ja Lounais-Suomessa sijaitsevalla säävyöhykkeellä I hieman muita Suomen säävyöhykkeitä (II-IV) korkeampi (Laukkarinen ym. 2022). Tutkimusosiossa käytetään Helsinki-Vantaan lentoasemalla sijaitsevan Ilmatieteen laitoksen sääaseman havaintoainestoa, koska sen havaintoaseman sää-tiedoilla voidaan kuvata säävyöhykkeen I sääoloja (Kalamees ym. 2012).

Ilmatieteen laitos on valmistellut RASMI-hankkeessa (Jylhä ym. 2020) 30 vuoden (1989–2018) tunnittaisen aineiston Helsinki-Vantaan sääasemalla mitatuista säähavainnoista ja tässä tutkimusosiossa valitaan niistä yksi vuosi, joka soveltuu mahdollisimman hyvin rakennusten yllämpenemisriskin simulointitutkimukseen. Valintakriteereinä käytetään 20 °C ja 25 °C ylittävien ulkolämpötilojen astetuntimääriä sekä auringon säteilysummaa vaakapinnalle kesäkuukausien (touko-, kesä- ja elokuu) aikana.

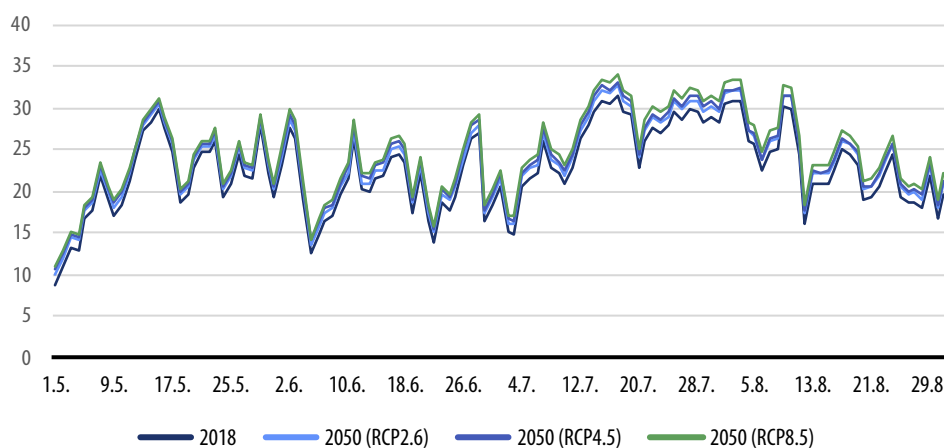
Kuvassa 2.1 on esillä Helsinki-Vantaan sääasemalla 30 vuoden aikana mitattujen kesäkuukausien ulkolämpötilojen 20 °C ja 25 °C ylittävät astetunnit. Kuva osoittaa, että kesäaikaiset ulkolämpötilat ovat nousseet 30 vuoden aikana ja erityisesti 2010-luvulla on ollut useita aikaisempaa kuumempia kesiä. Vuoden 2018 kesällä 20 °C ja 25 °C ylittävät astetunnit sekä myös auringon kokonaissäteilysumma vaakapinnalle olivat koko 30-vuotisen jakson korkeimmat. Helsinki-Vantaan sääasemalla mitattiin myös koko 30-vuotisen jakson pisin yhtenäinen hellejakso, joka kesti 25 päivää (Velashjerdi Farahani ym. 2022). Lisäksi 2018 pitkistä helleaallosta raportoitiin aiheutuneen Suomessa noin 380 ennen aikaista kuolemaa (Kollanus 2019). Edellä mainittujen seikkojen vuoksi rakennusten lämpöolojen ja lämpöviihtyvyyden simulointitutkimukseen valittiin vuoden 2018 säätiedot.

Kuva 2.1. Helsinki-Vantaan sääaseman kesäkuukausien ulkolämpötilan 20 °C ja 25 °C ylittävät astetunnit 30 vuoden aikana.



Ilmaston lämpenemisen vaikutusta rakennusten yllälämpenemiseen tutkittiin vuoteen 2018 pohjautuvalla sääaineistolla, jolle Ilmatieteen laitos teki RASMI-hankkeessa 2050-luvulle ulottuvan ilmastonmuutoskorjauksen käyttäen kolmea eri päästöskenaariota RCP2.6, RCP4.5 ja RCP 8.5 (Jylhä ym. 2020). Kuvassa 2.2 on esillä vuoden 2018 sekä vuoden 2050 eri päästöskenaarioiden mukaiset kesäkuukausien vuorokauden korkeimmat ulkolämpötilat. Kun vuorokauden korkein lämpötila on kesällä 2018 noin 31 °C, niin vuonna 2050 se olisi 34 °C, mikäli korkein päästöskenaariota RCP8.5 toteutuu. Vuoden 2018 kolmen kesäkuukauden aikana hellepäiviä, jolloin vuorokauden korkein lämpötila ylittyy 25 °C, on kaikkiaan 39 kpl. Päästöskenaariosta riippuen hellepäiviä olisi vuonna 2050 vastaavasti 49–56 kpl.

Kuva 2.2. Vuorokauden korkein lämpötila (°C) Helsinki-Vantaalla kesäkuukausien aikana vuonna 2018 ja 2050 eri päästöskenaarioilla.



2.3.2 Lämpöolojen ja lämpöiihtyvyyden simulointi

Rakennusten lämpöoloja ja energiankulutusta sekä ihmisten kokemaa lämpöiihtyvyyttä tutkitaan dynaamisen IDA ICE -simulointiohjelman avulla. Ohjelmalla on mahdollista simuloida monivyohtyöhykkisiä rakennuksia ja taloteknisiä järjestelmiä ottaen samanaikaisesti huomioon sääolosuhteet, auringon varjostukseen liittyvät tekijät rakennuksen ulkopuolella ja rakennuksessa, tilakohtaiset lämpökuormat auringon säteilystä sekä rakennuksen käytöstä johtuen ihmisistä, laitteista ja valaistuksesta. Simulointiohjelma ottaa huomioon muun muassa rakenteiden lämmönvarauskyvyn ja lämpöhäviöiden vaikutuksen huonelämpötiloihin ja rakennuksen energiankulutukseen. Lisäksi ohjelma ottaa tilojen väliset lämpötila- ja paine-erot huomioon, joten ohjelmalla on mahdollista tutkia kuinka yksittäiseen huonetilaan asennettu huonejäähdytyslaite vaikuttaa esimerkiksi muissa saman asunnon huoneissa.

IDA ICE simuloi rakennuksessa olevien ihmisten kokemaa lämpöiihtyvyyttä Fangerin kehittämään PMV/PPD-mallia käyttäen (Fanger 1970). Malli kuvaa ihmisten kokemaa lämpöaistimusta PMV- ja PPD-indeksien (predicted mean vote ja predicted percentage of dissatisfied) avulla ottaen huomioon neljä ulkoista tekijää (ilman lämpötila, nopeus ja suhteellinen kosketus sekä keskimääräinen säteilylämpötila) ja kaksi sisäistä tekijää (ihmisen aktiivisuustaso ja vaatetus). Tässä simulointitutkimuksessa ilman nopeutena käytetään vakioarvoa 0,1 m/s, mutta muut ulkoiset tekijät määräytyvät kunkin simuloitavan huoneen hetkittäisen lämpötilan, suhteellisen kosteuden sekä säteilylämpötilan perusteella. Lisäksi ihmisten aktiivisuustasona käytetään kaikkien rakennusten osalta samaa arvoa 1,2 MET, joka kuvaa istuvan henkilön aktiivisuustasoa. Kaikkien rakennusten osalta ihmisten vaatetustaso vuoden aikana vaihtelee välillä 0,35 (kevyet kesävaatteet) ja 0,85 (sisävaatteet talvella) koetun lämpöiihtyvyyden mukaisesti. Sekä vanhainkodeissa että muissa asuinrakennuksissa käytetään samaa aktiivisuustasoa ja vaatetusta tulosten vertailun helpottamiseksi. PMV-indeksi kuvaa ihmisen keskimääräistä lämpöaistimusta 7-portaisella asteikolla taulukon 2.1 mukaisesti. Tässä tutkimuksessa ihmisen lämpöaistimusta analysoidaan PVM-indeksin avulla.

Taulukko 2.1. PMV-indeksin arvot 7-portaisella asteikolla esitettynä.

PMV:	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	kylmä	viileä	hieman viileä	neutraali	hieman lämmin	lämmin	kuuma

2.3.3 Huonelämpötilojen ja lämpöiihtyvyyden tavoitearvot

Rakennusten lämpöoloja analysoidaan vertaamalla simuloituja huonelämpötiloja voimassa olevien ympäristöministeriön sekä sosiaali- ja terveysministeriön asetusten lämpötilarajoihin. Ympäristöministeriön asetuksessa (1010/2017) uusien rakennusten energiatehokkuuteen liittyen vanhainkotien jäähdytysrajana käytetään 25 °C ja asuinrakennusten osalta 27 °C (Ympäristöministeriö 2017). Asetuksen mukaan rakennusten suunnittelu- ja uudisvanhainkodin simuloitu huonelämpötila ei saa ylittää jäähdytysrajana käytettyä lämpötilaa 25 °C yli 150 astetuntia touko-elokuun aikana, kun rakennus simuloidaan keskimääräisiä sääoloja kuvaavalla Vantaan energianlaskennan testivuodella 2012 ja asetuksen mukaisella vakioidulla rakennuksen käytöllä. Vastaava vaatimus koskee myös uudiskerrostaloja, mutta astetunnit lasketaan kerrostalon jäähdytysrajaa 27 °C käyttäen. Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen (545/2015) toimenpideraja on 30 °C lämmityskauden ulkopuolella esimerkiksi vanhainkodeille ja kotihoidossa oleville vanhuksille ja 32 °C kaikille muille asunnoille (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Edellä mainituista lämpötilarajoista johtuen tässä tutkimusosiossa lasketaan ja analysoidaan 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vanhainkotien kuumimmassa asunnossa ja muiden asuinrakennusten kuumimmassa makuuhuoneessa koko simuloitavan vuoden aikana.

Ihmisten kokemaa lämpöiihtyvyyttä kesäkuukausien (touko-elokuu) aikana analysoidaan PMV-indeksin avulla ja analysoitavina tiloina käytetään vanhainkotien osalta kuuminta asuntoa ja muiden asuinrakennusten osalta kuuminta makuuhuonetta. Simuloituja PVM-indeksin arvoja verrataan standardin SFS-EN 16798-1 sisäympäristön laatuluokkiin I-III. Laatuluokassa I PVM-indeksi voi vaihdella välillä $\pm 0,2$, laatuluokassa II välillä $\pm 0,5$ ja laatuluokassa III välillä $\pm 0,7$. Laatuluokka I kuvaa korkeaa sisäympäristön tasoa, jota voidaan käyttää henkilöille, joilla on erityistarpeita kuten lapset, iäkkäät, vammaiset. Laatuluokka II kuvaa keskitasoa, jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille. Laatuluokka III kuvaa kohtalaista sisäympäristön tasoa, ja sitä voidaan soveltaa olemassa oleville rakennuksille.

2.4 Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat

Kesäajan korkeiden lämpötilojen Suomessa aiheuttaman terveyshaitan suuruusluokkaa arvioitiin laskemalla *ulkoilman* korkeisiin lämpötiloihin liittyvien kuolemien ja sairaalahoitajaksojen vuosittaisia lukumääriä Uudellamaalla ja Pohjois-Pohjanmaalla nykyisin ja tulevaisuudessa. Laskennat tehtiin vaikutusarvioinnin menetelmin (Koljonen ym. 2017), ja työssä käytettiin suomalaisesta aineistosta tässä projektissa tuotettuja altiste-vastesuhteita, jotka kuvaavat terveyshaitan suuruutta erilaisilla altistumistasoilla. Haittavaikutusten määrää laskettaessa tarvitaan altiste-vastesuhteen lisäksi tieto väestön määrästä (eri ikäluokissa), kuumuudelle altistumisen yleisyydestä ja voimakkuudesta sekä kuolleisuuden ja sairaalahoidon taustariskistä.

Rakentamisen ohjeistamisen kannalta, ja yleisemmin terveydensuojelun, olisi hyödyllistä tietää korkeista *sisälämpötiloista* aiheutuvien terveyshaittojen suuruus sekä toisaalta sisälämpötila, jonka ylittyessä vakavat terveyshaitat alkavat lisääntyä. Hankkeessa käytiin läpi kansainvälistä kirjallisuutta sen selvittämiseksi, mitä sisälämpötilan yhteydestä vakaviin terveyshaittoihin tiedetään epidemiologisten tutkimusten perusteella. Hankkeessa myös arvioitiin helsinkiläisistä asunnoista kerätyn sisälämpötila-aineiston avulla, missä määrin ulkolämpötiloista voi päätellä asuntojen sisälämpötiloja väestötasolla (ks. luku 2.1.3) sekä mahdollisesti edelleen sisälämpötilan haittavaikutuksen kynnyksarvoa.

2.4.1 Altiste-vastesuhteet

Kesäajan päivittäisen lämpötilan ja helleaaltopäivien vaikutusta kuolleisuuteen ja sairaalan vuodeosastohoitoon ottoihin (jatkossa lyhyesti ”sairaalakäynnit”) tarkasteltiin pääkaupunkiseudulla (Helsinki, Espoo, Vantaa ja Kauniainen) vuosina 2001–2018 hyödyntäen väestötason epidemiologisia tilastomenetelmiä.

Tilastolliset analyysit perustuivat rekisteriaineistoon päivittäisistä ei-tapaturmaisista (ICD-10 tautiluokituksen syykoodit A00-R99) kuolemantapauksista sekä sairaalakäynneistä tutkimusalueella kesä-elokuussa 2001–2018. Aineisto päivittäisistä kuolemantapauksista saatiin Tilastokeskuksen kuolemansyyrekisteristä ja sairaalahoitojaksoista Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen ylläpitämästä Hoitoilmoitusrekisteristä (HILMO). Sairaalakäyntejä koskevaan aineistoon sisällytettiin ainoastaan päivystyksen kautta vuodeosastohoitoon tulleet potilaat. Aineistot rajattiin niihin pääkaupunkiseudulla tapahtuneisiin kuolemiin ja sairaalahoitojaksoihin, joissa henkilön kotipaikka oli jokin pääkaupunkiseudun kunnista. Tilastollisia analyysejä varten kuolemantapaukset ryhmiteltiin ikäluokittain (koko väestö, 0–64, 65–74, ≥65, ≥75).

Altistemuuttujina tilastollisessa tarkastelussa käytettiin ulkoilman vuorokauden keskilämpötilaa tai vaihtoehtoisesti helleaaltopäivän indikaattoria (kyllä/ei), joiden määrittely perustui Ilmatieteen laitoksen tilastotietokannasta saatuun havaintoaineistoon Helsinki-Vantaan lentokentältä. Helleaalloiksi määriteltiin kesä-elokuun kuumat jaksot, jolloin vuorokauden keskilämpötila ylitti touko-elokuun 2001–2018 lämpötilajakauman 90. prosenttipisteen (20,9 °C) yhtäjaksoisesti vähintään kolmen vuorokauden ajan. Helleaallolle ei ole olemassa standardoitua määrittelytapaa, mutta vastaavaa määritelmää on käytetty myös aikaisemmissa Suomea koskevissa tutkimuksissa (Kollanus ym. 2021, Sohail ym. 2020). Helleaaltopäiviksi luokiteltiin kaikki helleaaltojakson päivät, mukaan lukien kaksi ensimmäistä päivää. Ilmatieteen laitoksen tilastotietokannasta haettiin myös tiedot ulkoilman suhteellisesta kosteuspitoisuudesta ja ilmanpaineesta.

Päivittäisen lämpötilan ja helleaaltopäivien tilastollista yhteyttä kuolleisuuteen ja sairaalakäynteihin tarkasteltiin ikäluokittain aikasarja-analyysin avulla käyttäen jakautuneiden viiveiden epälineaarista mallinnusta (*Distributed lag non-linear model (DLNM)*, Gasparrini ym. 2010). Viiveenä mallinnuksessa käytettiin 21 vuorokautta. Tarkastelun tuloksena saadaan siis estimaatti, joka kuvaa tietyn vuorokausilämpötilan tai helleaaltopäivän kumulatiivista kokonaisvaikutusta, niin haitallisia kuin mahdollisia hyödyllisiäkin vaikutuksia, samana päivänä ja seuraavan kolmen viikon aikana. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuolemat, jotka todennäköisesti olisivat tapahtuneet lämpötilasta riippumatta muutaman viikon sisällä, jätetään huomioimatta.

Mahdollinen ylihajonta vastemuuttujissa huomioitiin soveltamalla mallinnuksessa Quasi-Poisson-menetelmää. Aikatrendi mallinnettiin vuoden ja kuukauden, näiden yhdysvaikutuksen, viikonpäivän sekä julkisia lomapäiviä kuvaavan indikaattorin avulla. Sekoittavina tekijöinä mallissa huomioitiin ilman suhteellinen kosteuspitoisuus ja ilmanpaine (sama vuorokausi sekä keskiarvo 1–3 vuorokautta edeltävältä ajalta).

Päivittäisen lämpötilan vaikutusta koskevan analyysin tuloksena saadaan suhteellinen riski (relative risk, RR), joka kuvaa, kuinka paljon kuolleisuuden tai sairaalakäyntien riski lisääntyy tietyssä vuorokausilämpötilassa suhteessa vertailulämpötilaan. Vertailukohtana käytettiin lämpötilaa, jossa koko väestön tai tietyn ikäluokan päivittäinen kuolleisuus tai sairaalakäyntien määrä oli matalimmillaan kesä-elokuussa 2001–2018. Lopullinen vaikutusestimaatti saatiin laskemalla asteen välein eri lämpötiloille saaduista estimaateista keskiarvo, joka kuvaa riskin keskimääräistä lisääntymistä aina yhden celsiusasteen muutosta kohden, kun vuorokauden lämpötila ylittää vertailulämpötilan.

Helleaaltopäivien vaikutusta koskevan analyysin tuloksena saadaan puolestaan RR, joka kuvaa, kuinka paljon kuoleman tai sairaalakäynnin riski lisääntyy helleaaltopäivien aikana keskimäärin suhteessa vertailupäiviin. Vertailupäivinä käytettiin kaikkia kesä-elokuun 2001–2018 päiviä, jotka eivät lukeutuneet helleaaltopäiviin.

2.4.2 Vaikutusarviointi

Vaikutusarvioinnissa laskettiin helteen vuosittain aiheuttamia kuolemantapauksia ja sairaalahoitajaksoja (jatkossa lyhyesti "sairaalakäyntejä") Uudellamaalla ja Pohjois-Pohjanmaalla. Tarkastelujankohtina olivat nykypäivä sekä vuodet 2050 ja 2080.

Lämpötila-aineisto

Nykypäivän ilmastoa kuvaamaan käytettiin vuosina 1999–2018 havaittuja vuorokauden keskilämpötiloja Uudellamaalla (Helsinki-Vantaa) ja Pohjois-Pohjanmaalla (Oulu). Tulevaisuuden lämpötiloille käytettiin kolmea eri skenaariota: SSP1-2.6, SSP2-4.5 ja SSP5-8.5. Tulevaisuuden lämpötilat laadittiin 25 eri ilmastomalliin pohjautuvien harhakorjattujen (Ruosteenoja ym. 2016b) aikasarjojen avulla aikapisteisiin 2050 ja 2080 käyttäen 20 vuoden aikaikkunoita (2041–2060 ja 2071–2090). Arvio korkeiden lämpötilojen terveyshaitoista kussakin skenaariossa (ja aikapisteessä) saatiin laskemalla ensin haitat kutakin eri ilmastomallia vastaavia lämpötiloja käyttäen ja laskemalla sitten kaikkien mallien tuloksista keskiarvo. Lähestymistavan avulla niin lämpötilan vaihtelu vuodesta toiseen kuin lämpötilan ennustamisen epävarmuuskin tulevat huomioituiksi.

Hellepäivän määritelmänä laskennassa käytettiin vuosien 1999–2018 kesäajan (1.5.–31.8.) päivittäisen keskilämpötilan 90. prosenttipisteen, ts. kynnyslämpötilan, ylitystä. Helleaaloksi määriteltiin vähintään kolmen peräkkäisen hellepäivän jakso. Hellepäivän kynnyslämpötila määriteltiin tässä työssä Uudenmaan havaintojen perusteella (eli samaa lämpötilaa käytettiin Pohjois-Pohjanmaalla).

Kuolleisuus-, sairaalakäynti- ja väestöaineisto

Tilastokeskuksen tilastotietokannoista saatua ikäluokka- ja maakuntaakohtaista kuolleisuus- ja väestöaineistoa käytettiin kuolleisuuden taustariskin sekä altistuvan väestön määrän arvioimiseen. Kuolleisuusluvuista poistettiin onnettomuudet ja väkivaltaiset kuolemat, koska on haluttu keskittyä helteen suurempiin vaikutuksiin. Arvio tulevaisuuden väestömäärästä ja ikärakenteesta perustui Tilastokeskuksen vuoden 2040 väestöennusteeseen, josta edelleen graafisesti ekstrapoloitiin maakunta- ja ikäluokakohtaisesti vuosien 2050 ja 2080 väestö (taulukko 2.2). Sairaalakäyntien taustariski arvioitiin Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen hoitoilmoitusrekisteristä (HILMO) saadun aineiston perusteella. Kuolleisuuden ja sairaalakäyntien taustariski arvioitiin erikseen nykypäivälle sekä vuodelle 2050 huomioiden väestön ikärakenteessa tapahtuvat muutokset (taulukko 2.3). Vuodelle 2080 käytettiin samoja taustariskiarvoja kuin vuodelle 2050, koska taustariskin arviointiin pitkälle tulevaisuuteen liittyy liian suuria epävarmuuksia.

Taulukko 2.2. Yli 65-vuotiaiden määrä nykyisin ja tulevaisuudessa.

Väestö	2009	2050	2080
Uusimaa	204 086	433 000	520 700
Pohjois-Pohjanmaa	56 931	104 300	124 500

Taulukko 2.3. Kuolleisuuden ja sairaalakäyntien taustariski yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä nykyisin ja tulevaisuudessa.

Taustariski	2009	2050 ja 2080
Kuolleisuus (vuotuinen riski)		
Uusimaa	0,038	0,051
Pohjois-Pohjanmaa	0,038	0,054
Sairaalakäynnit (päiväkohtainen riski)		
Uusimaa	0,00043	0,00048
Pohjois-Pohjanmaa	0,00064	0,00074

Terveysvaikutusten laskenta

Projektissa määritettyjen altiste-vastesuhteiden avulla voidaan vaikutusarvioinnissa laskea korkeiden päivittäisten lämpötilojen ja helleaaltopäivien aiheuttamat terveysvaikutukset hyödyntäen WHO:n käyttämää väestösyösuus (*population attributable fraction*) -laskentatapaa. Alla on esitetty kaavat, joiden avulla laskettiin terveysvaikutukset jokaiselle päivälle ja eri maakunnille.

$$RR' = \exp(\ln(RR_i) * C_r) \quad (1)$$

RR' = altistumisesta aiheutuva suhteellinen riski

RR_i = suhteellinen riski ikäluokassa i altisteyksikköä kohti (altiste-vastesuhde)

C_r = maakunnassa r lämpöasteet, jotka ylittävät matalinta kuolleisuutta/sairaalakäyntien määrää vastaavan lämpötilan

$$PAF = (RR' - 1) / RR' \quad (2)$$

PAF = väestösyösuus

$$D = p_{i,r} * MR_{i,r} * PAF \quad (3)$$

D = korkeiden lämpötilojen aiheuttamien kuolemantapausten/sairaalakäyntien määrä

$p_{i,r}$ = väestön määrä ikäluokassa i , maakunnassa r

$MR_{i,r}$ = taustakuolleisuus ikäluokassa i , maakunnassa r

Helleaaltojen haittavaikutuksia laskettaessa altisteena on ulkolämpötilan sijasta helleaaltopäivä, ja RR' on kuoleman/sairaalakäynnin riski helleaaltopäivinä suhteessa vertailupäiviin.

Sisälämpötilojen mittausaineisto ja sisälämpötilan yhteys terveyteen

Hankkeessa oli käytössä vuoden 2021 kesän (15.5.–31.8.) aikana helsinkiläisissä kerrostaloasunnoissa mitattu sisälämpötila-aineisto. Mitattuja asuntoja oli lähes 4200, joista vanhimmat oli rakennettu 1920-luvulla ja uusimmat 2010-luvulla. Jokainen asunto oli varustettu yhdellä asunnon eteiseen asennetulla IoT-lämpötilamittarilla, joka mittasi sisälämpötilaa tunneittain $\pm 0,2$ °C tarkkuudella. Mittarin sijainnista johtuen mitattu lämpötila kuvaa melko hyvin asunnon keskimääräistä sisälämpötilaa, joten mitatuissa asunnoissa saattoi esiintyä myös mitattuja lämpötiloja korkeampia huonelämpötiloja. Lämpötilamittarit oli asennettu niin, ettei niihin osunut suoraa auringon säteilyä, joka olisi voinut vääristää mittaustulosta.

Sisälämpötilan ja terveyshaittojen välisestä yhteydestä julkaistuja tieteellisiä tutkimuksia haettiin PubMed sekä Web of Science -tietokannoista. Hakusanoina käytettiin sisälämpötilan osalta termejä *“indoor temperature*”, “indoor heat”, “residential temperature”, “residential heat*”, “indoor therm*”* sekä *“indoor climate”*. Terveysvaikutusten osalta hakusanoina käytettiin termejä *health, human, well-being, wellbeing, hazard*, mortality, morbidity, disease*, death*, ill*, stress*, condition*, complication*, sick, “thermal comfort”, hospital*, cardiovascular, respiratory, “myocardial infarction”, coronary, “heart attack”, stroke, angina, blood pressure, hyperthermia, “heat stroke”, heatstroke, “heat exhaustion”, dehydration, “chronic obstructive pulmonary disease”, COPD, asthma, bronchitis, dementia, fall*, accident*, injur*, mental health, depression, “excess summer death*”, vulnerability, elderly, infirm, “older people”, diabetes, mobility, “multiple sclerosis”, BMI, “body mass index”, agitation, cognition, sleep*, kidney, mental, nervous*. Hakusanojen tuli esiintyä julkaisun otsikossa tai tiivistelmässä. Lisäksi kirjallisuushaussa käytiin läpi aiheesta julkaistujen tieteellisten katsausartikkeleiden sekä Maailman terveysjärjestön (WHO) asumisterveyttä koskevan ohjeistuksen yhteydessä laaditun systemaattisen katsauksen lähdeluettelot.

3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset tyypillisiin rakenteisiin ja rakennuksiin

3.1 Kosteusteknisten riskirakenteiden tunnistaminen

Yhtenä osana ilmastonmuutoksen vaikutuksista suomalaisiin rakennuksiin tutkimuksessa pyrittiin tunnistamaan kosteusteknisesti riskialttiita rakenteita suorittamalla rakennusfysikaalisia tarkasteluja tyypillisille julkisivurakenteille ja arvioimalla rakenteiden homehtumisherkkyyttä nykyilmastossa sekä muuttuvassa ilmastossa Suomalaisen homemallin avulla.

3.1.1 Rakennusfysikaalinen tarkastelu

Tutkimuksessa rakenteiden rakennusfysikaaliset laskennat suoritettiin WUFI-2D (4.3) -laskentaohjelmalla. Säädatana laskennassa käytettiin RASMI-hankkeessa (Jylhä et. al 2020) tuotettuja säädatatietoja. Laskenta toteutettiin simuloimalla 30 vuoden pituisia aikajaksoja nykyilmastossa sekä tulevaisuuden ilmastossa. Laskenta aloitettiin suorittamalla eri rakennetyyppien rakennusfysikaalinen tarkastelu nykyilmaston lisäksi voimakasta ilmastonmuutosta kuvaavan RCP8.5-skenaarion (Representative Concentration Pathways) vuoden 2080 ilmastossa. Myöhemmin tarkastelua laajennettiin osassa rakenteita suorittamalla laskenta kohtalaista ilmastonmuutosta kuvaavan RCP4.5-skenaarion vuoden 2080 sekä RCP8.5-skenaarion vuoden 2050 säätietoennusteilla.

Rakenteiden simuloinnista saatujen olosuhdetietojen pohjalta rakenteiden homehtumisriskiä arvioitiin laskemalla kunkin 30 laskentavuoden maksimihomeindeksi hyödyntämällä Suomalaista homemallia (Suomalainen homemalli 2018). Homeindeksin avulla voidaan arvioida todennäköisyyttä sille, esiintyykö rakenteessa hometta ja vertailemalla eri skenaarioiden ilmastodatalla saatuja tuloksia voidaan arvioida kuinka riski homeenkasvulle muuttuu tulevaisuuden ilmastoissa.

Simuloidut rakenteet

Julkisivurakenteiden rakennusfysikaalisessa tarkastelussa pyrittiin ottamaan huomioon mahdollisimman kattavasti eri materiaalien ominaisuuksien sekä rakenteisiin liittyvien detaljien vaikutus laskennan tuloksiin. Yksittäisiä ominaisuuksia varioitiin saman rakenteen osalta, jotta saatiin kuva kyseisen rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen ja siten

homehtumisriskiin vaikuttavista yksityiskohdista. Tutkimukseen on sisällytetty seuraavat tyypilliset julkisivurakenteet:

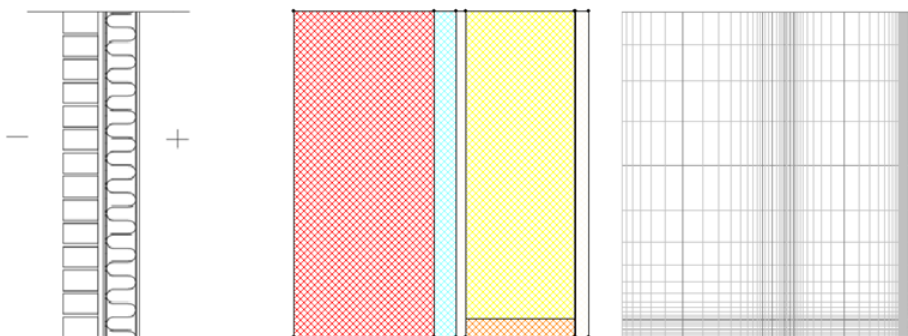
- tiilimuurattu puurunkoinen ulkoseinärakenne
- tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenne
- tiili-villa-betoni-ulkoseinärakenne
- betonisandwich-ulkoseinärakenne
- ohutrappaus-eristejärjestelmä
- puu- ja levyverhoiltu puurunkoinen ulkoseinärakenne.

Suomalaisessa rakennuskannassa on eri ikäisiä rakennuksia, jotka on rakennettu toisistaan poikkeavien rakentamistapojen ja rakennusmääräysten vallitessa. Esimerkiksi lämmöneristepaksuudet ja rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet ovat muuttuneet vuosien saatossa. Eri aikakausien rakenteet on otettu huomioon laskentatarkastelussa varioimalla seuraavia ominaisuuksia:

- huokoisten materiaalien vedenimuominaisuudet
- lämmöneristepaksuus
- lämmöneristemateriaali
- höyrynsulku
- pinnoitteet ja maalit
- tuuletusvälit / -urat ja niiden ilmanvaihtuvuus
- tuulensuojalevyn materiaali.

Tutkittavien rakenteiden laskentamallit toteutettiin WUFI-2D-ohjelmassa pääosin 300 mm levyisinä rakenteina. Käytetty mallin leveys mahdollisti sen, että rankarakenteita sisältävät mallit voitiin luoda mahdollisimman yksinkertaiseksi. Kuvassa 3.1 on esitetty esimerkki tiiliverhoillusta puurunkoisesta seinärakenteesta luodusta mallista. Kuvassa esitetystä esimerkissä puurunkoisen seinärakenteen puurungosta on mallinnettu puolikas.

Kuva 3.1. Tiiliverhottu puurunkoinen seinärakenne: vasemmalla leikkauskuva, keskellä rakenteen geometrisen malli ylhäältä päin kuvattuna WUFI-2D-ohjelmassa, oikealla laskentaverkko WUFI-2D-ohjelmassa.



Simuloinnissa käytetyt muuttujat ja lähtötiedot

Laskennassa materiaalien ominaisuudet kerättiin WUFI-2D-ohjelman tietokannasta sekä kirjallisuuslähteitä hyödyntämällä. Taulukossa 3.1 on listattu laskentaohjelman vaatimat materiaalitiedot kunkin materiaalin osalta.

Taulukko 3.1. Laskennassa vaaditut materiaalitiedot.

Tiheys
Huokoisuus
Ominaislämpökapasiteetti
Lämmönjohtavuus
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin
Tasapainokosteuskäyrä
Kosteusdiffusiviteetti
Lämmönjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona

Laskennassa ulko- ja sisäpintojen lämmönsiirtokerroina käytettiin WUFI-2D-ohjelman oletusarvoja: ulkopinnalle $17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ja sisäpinnalle $8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Taulukossa 3.2 on esitetty käytetyt ulkopintojen absorptiokerroimet. Rakennusmateriaalien emissiviteettinä käytettiin arvoa 0.9 jokaiselle materiaalille.

Taulukko 3.2. Ulkopintojen absorptiokerroimet.

Ulkopinta	Absorptiokerroin [-]
Valkoinen maali	0,25
Keltainen maali	0,5
Punainen maali	0,7
Rappaus	0,4
Betoni	0,65
Punainen tiili	0,67

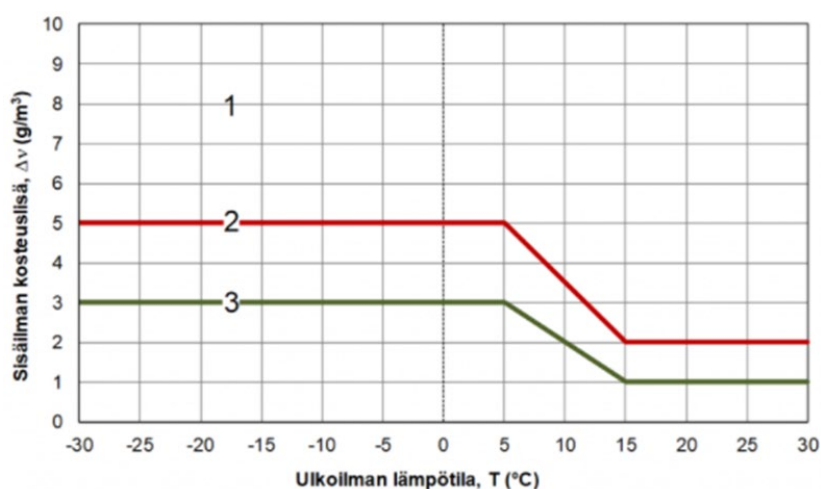
Viistosateen vaikutus käytetyssä laskentaohjelmassa otetaan huomioon viistosadekertoimen avulla. Kerroin perustuu ASHRAE 160 -standardiin (ASHRAE 2009) ja kokonaiskertoimeen vaikuttavat vaakapinnan sateen intensiteetti, sateen altistumiskerroin, sateen kerrostumiskerroin ja tuulen nopeus. Laskentaan valittiin kolme viistosadekerrointa kuvaamaan eri kokoisia rakennuksia. Kerroimet kullekin rakennuksen tyypille on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3. Eri rakennustyyppien käytetyt viistosadekerroimet laskentaohjelmassa.

Rakennus	Viistosadekerroin
Pientalo	0,07
Matala kerrostalo	0,14
Korkea kerrostalo	0,3

Sisäilman lämpötilaksi valittiin vakiolämpötila 21 °C ja sisäilman kosteuslisänä käytettiin julkaisun RIL 107-2012 luokan 2 (asuinrakennukset) kosteuslisää. Kuvassa 3.2 näkyvät käytetyt kosteuslisän mitoitusarvot.

Kuva 3.2. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot ulkoilman lämpötilan funktiona (RIL 107-2012).



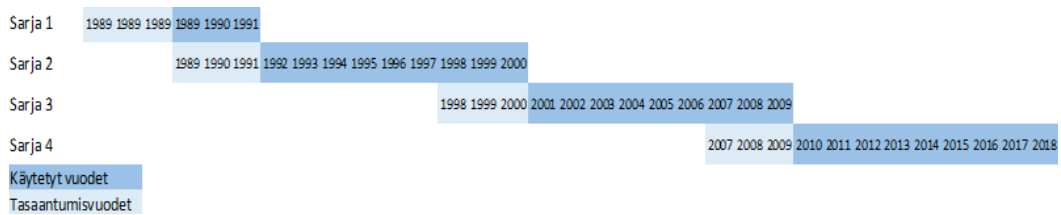
Laskentavuodet

Rakennusfysikaalinen laskenta suoritettiin hyödyntämällä mitattua säädataa vuosilta 1989–2018 sekä RASMI-hankkeessa (Jylhä ym. 2020) muodostettuja tulevaisuuden (vuosien 2050 ja 2080 ilmasto) 30-vuotisia sääaikaasarjoja. Nämä aikasarjat oli määritelty mitatun säädatan ja ilmastomallien tulosten perusteella kolmelle eri päästöskenaariolle RCP2.6 (vähäinen ilmastonmuutos), RCP4.5 (kohtalainen ilmastonmuutos) ja RCP8.5 (voimakas ilmastonmuutos) (Jylhä ym. 2020).

Tässä tutkimuksessa pääosa laskennallisesta tarkastelusta suoritettiin hyödyntämällä mitattua ilmastodataa (vuodet 1989–2018) sekä RCP8.5-skenaarion mukaista 30-vuotista sääaikaasarjaa vuoden 2080 ilmastolle. Aikasarjoissa esiintyvät vaihtelut vuodesta toiseen kuvaavat sääolojen luontaista vaihtelua. Myöhemmin laskentaa laajennettiin tekemällä osalle rakenteista 30 vuoden tarkasteluja hyödyntämällä vuoden 2050 ilmastodataa skenaariossa RCP8.5 sekä vuoden 2080 ilmastodataa skenaariossa RCP4.5.

30 vuoden laskennallinen tarkastelu suoritettiin neljässä osassa siten, että kussakin sarjassa laskennassa ajettiin kolme tasaantumivuotta, joilla pyrittiin poistamaan materiaali-kerroksille annettujen kosteuden ja lämpötilan lähtöarvojen vaikutus tuloksista. Kuvassa 3.3 on havainnollistettu 30 vuoden laskennan toteutusta neljässä sarjassa tasaantumivuosien kanssa.

Kuva 3.3. Havainnekuva 30 vuoden laskennan toteuttamisesta neljässä osassa.



Ensimmäisen sarjan osalta tasaantuminen toteutettiin käyttämällä vuotta 1989 tasaantumivuotena kolme kertaa ennen varsinaista käytettyä simulointivuotta. Vuosien yhdisteleminen toteutettiin sekä nykyilmaston, että tulevaisuuden ilmastojen osalta samalla periaatteella.

3.1.2 Homehtumisriskin arviointi

Homehtumisriskin arviointiin käytettiin Suomalaista homemallia (Suomalainen homemalli 2018). Homemallissa materiaalin homehtumista kuvataan homeindeksillä M. Homeindeksi saa arvoja välillä 0-6. Indeksien arvo nolla kuvaa tilannetta, jossa havaittua homeenkasvua ei ole, ja indeksin arvo kuusi kuvaa erittäin runsasta homeenkasvua. Taulukossa 3.4 on esitetty homeindeksien arvojen kuvaukset.

Malli hyödyntää rakennusfysikaalisesta simulointiohjelmasta saatavia lämpötila- ja kosteusolosuhdetietoja tarkastelupisteessä. Olosuhdetietojen lisäksi mallista saatavaan homeindeksiin vaikuttavat tarkastelupisteen materiaaleista riippuvat homeen kasvunopeuden ja homeen maksimimäärän herkkyysluokat sekä homeen taantumaluokka. Tarkastelupisteen sijaitessa kahden eri materiaalin rajapinnassa on mahdollista, että rajapinnan materiaalit voivat kuulua kahteen eri homehtumisherkkyyssluokkaan. Tällöin homeen kasvunopeudelle ja maksimimäärälle käytetään eri kertoimia, mikäli tarkasteltavan materiaalin viereinen materiaali on homeen kasvun kannalta herkempi. Homehtumisherkkyyssluokat on Suomalaisessa homemallissa esitetty materiaalityypittain taulukon 3.5 mukaisesti.

Taulukko 3.4. Homeindeksien luokittelu (Suomalainen homemalli 2018).

Homeindeksi [M]	Havaittu homeenkasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla), useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 %:n peitto alasta (silmillä) Alle 50 %:n peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu	Yli 10 %:n peitto alasta (silmillä) Yli 50 %:n peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 %:n peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 %:n peitto, tiivis kasvusto

Taulukko 3.5. Rakennusmateriaalien jakautuminen homehtumisherkkyyssluokkiin (Suomalainen homemalli 2018).

Homehtumisherkkyyssluokka		Esimerkkejä rakennusmateriaaleista
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara, höylätty mänty, koivuvaneri, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy, kartonkipintainen kipsilevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset bitumoidut/käsittellyt tuotteet ja kalvot, puupohjaiset liimatut levyt, havuvaneri, bitumoitu/käsitelty huokoinen kuitulevy, lasikuitupintainen kipsilevy
HHL3	Kohtalaisen herkkä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet, kuitusementtilevy, lasikuitupintainen kipsilevy
HHL4	Kestävä	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita huomesuoja-aineita sisältävät materiaalit

Suomalaisessa homemallissa homeen taantumaluokat määräytyvät homehtumisherkkyyssluokan mukaan taulukossa 3.6 esitetyllä tavalla.

Taulukko 3.6. Homeen taantumaluokat ja vastaavat kertoimet homehtumisherkkyyssluokissa (Suomalainen homemalli, 2018).

Homehtumis-herkkyyssluokka	Homeentaantumaluokka	Kerroin
HHL1	HTL2 merkittävä taantuma	0,5
HHL2	HTL3 kohtalainen taantuma	0,25
HHL3	HTL4 vähäinen taantuma	0,1
HHL4	HTL4 vähäinen taantuma	0,1

Tässä tutkimuksessa rakenteiden riskiluokittelu homeenkasvulle perustuu 30 vuoden tarkastelussa yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien kertymään. Taulukossa 3.7 on esitetty käytettävä luokittelu rakenteen homehtumisherkkyydestä.

Taulukko 3.7. Tutkimuksessa käytettävä luokittelu rakenteen homehtumisherkkyydestä.

Homeindeksin vuoden maksimiarvo [M] 30-vuoden tarkastelussa	Riski homeenkasvulle rakenteessa	Värikoodi
Mediaani > 3	Erittäin merkittävä	
Ylin 75 persentiili > 2	Merkittävä	
Mediaani > 2	Kohtalainen	
Ylin 75 persentiili > 1	Vähäinen	
Mediaani > 1	Erittäin vähäinen	
Mediaani < 1	Epätodennäköinen	

Käytetty luokittelu perustuu taulukossa 3.4 esitettyihin homeindeksien kuvauksiin homeenkasvusta. Homeindeksin arvo kolme (3) kuvaa silmin havaittavaa homeenkasvua. Siten tässä tutkimuksessa rakenteella katsotaan olevan erittäin merkittävä riski homeenkasvulle, mikäli 30 vuoden laskennassa yksittäisten vuosien homeindeksien maksimiarvojen mediaani ylittää homeindeksin arvon 3. Homeenkasvun riskin katsotaan olevan kohtalainen, mikäli yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien mediaani ylittää arvon kaksi (2). Homeindeksin arvo yksi (1) kuvaa määritelmän mukaan alkavaa homeenkasvua. Tämän johdosta epätodennäköiseksi riskiksi homeenkasvulle rakenteessa määriteltiin tilanne, missä yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien mediaani jää alle arvon yksi (<1).

3.1.3 Rakenteiden homehtumisriskitarkastelun tulokset

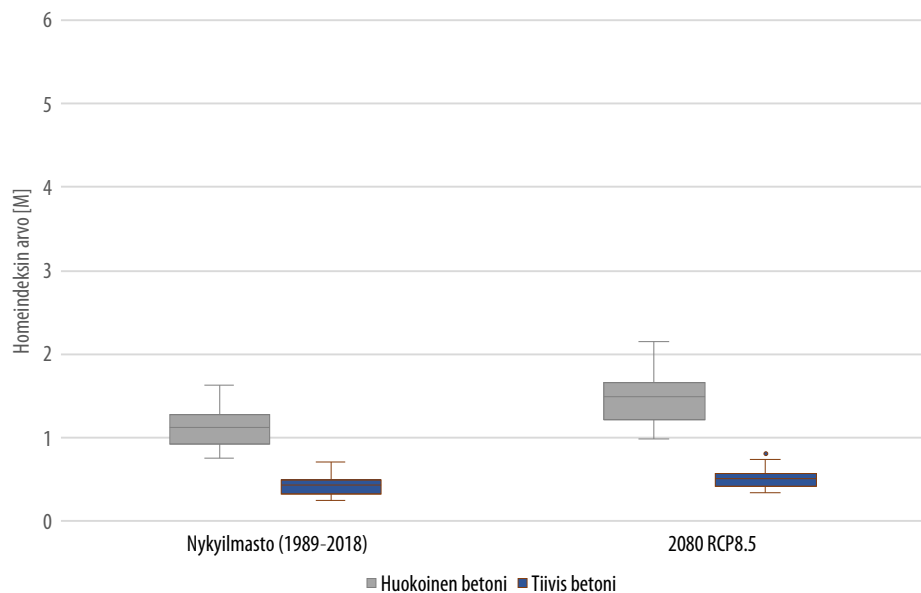
Seuraavassa on esitetty eri rakenteiden rakennusfysikaalisen tarkastelun ja Suomalaisen homemallin avulla saadut tulokset rakenteiden homehtumisriskistä. Tulokset on esitetty laatikko-janakuvaajina, joissa laatikot kuvaavat 50 %:a tapauksista. Arvojen mediaani on merkitty laatikon yli kulkevalla viivalla. Janan päätepisteet esittävät ääriarvoja. Pisteet janan ulkopuolella kuvaavat mahdollisia poikkeamia (outlier).

Betonisandwich-rakenteet

Betonisandwich-rakenteissa (BSW) laskennassa käytettiin korkean kerrostalon viistosadekerrointa 0,3 (ks. taulukko 3.3). BSW-rakenteiden yhteydessä tarkasteltiin veden-imuominaisuuksiltaan erilaisten betonilaatujen, lämmöneristepaksuuden sekä tuuletusurituksen vaikutusta rakenteen homehtumisherkkyyteen.

Kuvassa 3.4 on esitetty korkean, tuulettumattoman BSW-kerrostalon 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät vedenimuominaisuuksiltaan voimakkaan huokoisen betonin ja tiiviin betonin osalta eristepaksuuden ollessa 250 mm. Tarkastelupisteenä lämmöneristekerroksen ulkopinta.

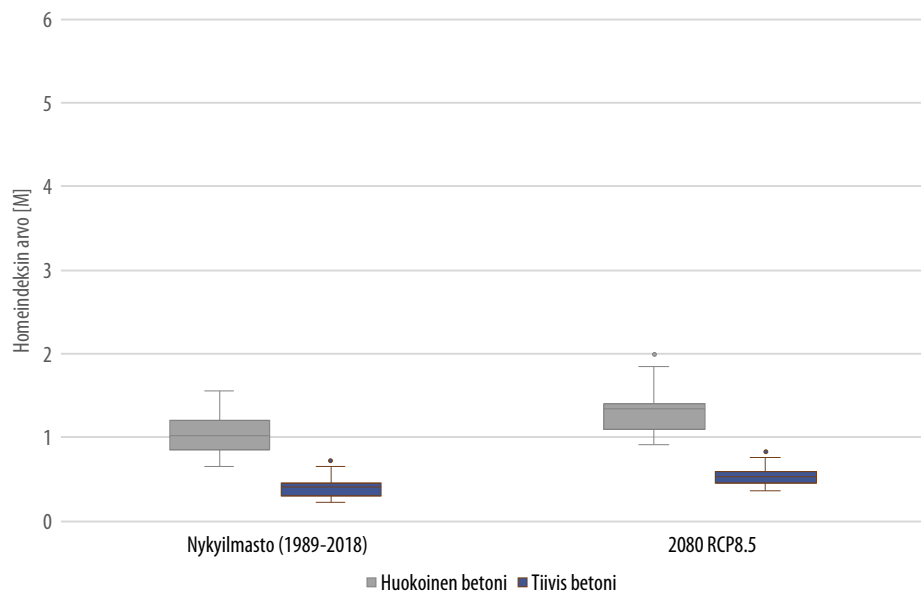
Kuva 3.4. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eteläjulkisivulla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastossa Vantaalla sijaitsevan betonisandwich-rakenteisen korkean kerrostalon eteläjulkisivun tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 250 mm ilman tuuletusuria.



Tiiviin betonin osalta maksimihomeindeksien mediaani jää selkeästi alle yhden sekä nykyilmastossa että skenaarion RCP8.5 2080 osalta. Vedenimuominaisuuksiltaan voimakkaan huokoisen betonin osalta maksimihomeindeksien mediaani sekä nykyilmastossa että skenaariossa RCP8.5 2080 ylitti arvon yksi.

Kuvassa 3.5 on esitetty korkean, tuulettumattoman BSW-kerrostalon 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät vedenimuominaisuuksiltaan voimakkaan huokoisen betonin ja tiiviin betonin osalta lämmöneristepaksuuden ollessa 90 mm. Tarkastelupisteenä lämmöneristekerroksen ulkopinta.

Kuva 3.5. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eteläjulkisivulla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastossa Vantaalla sijaitsevan betonisandwich-rakenteisen korkean kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 90 mm ilman tuuletusuria.

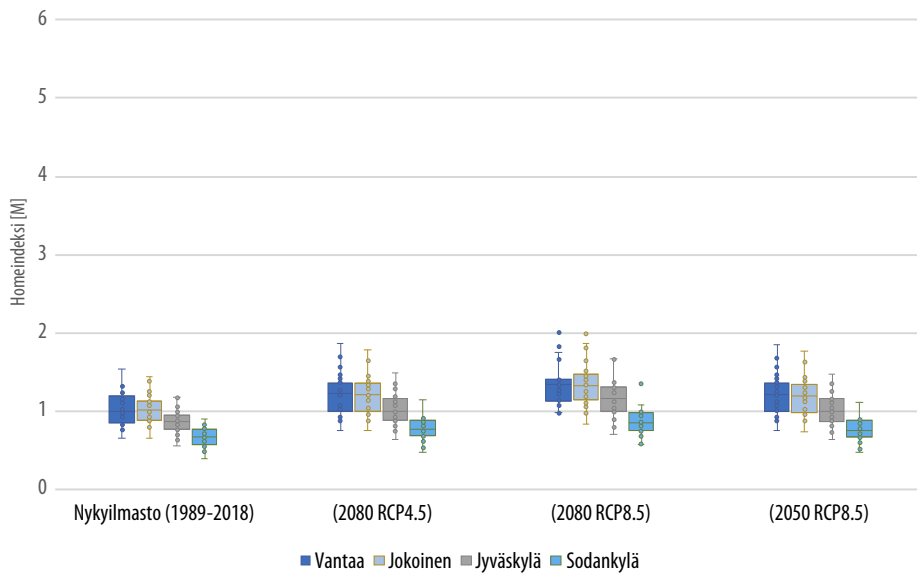


Homeindeksien maksimiarvojen mediaanit tiiviin betonin osalta jäävät kummankin ilmastoskenaarioiden osalta alle yhden. Vedenimuominaisuuksiltaan voimakkaammalla pesubetonisella rakenteella vuosittaisten homeindeksien maksimien mediaani nykyilmastossa sai arvon 1,02 ja skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastolla arvon 1,33.

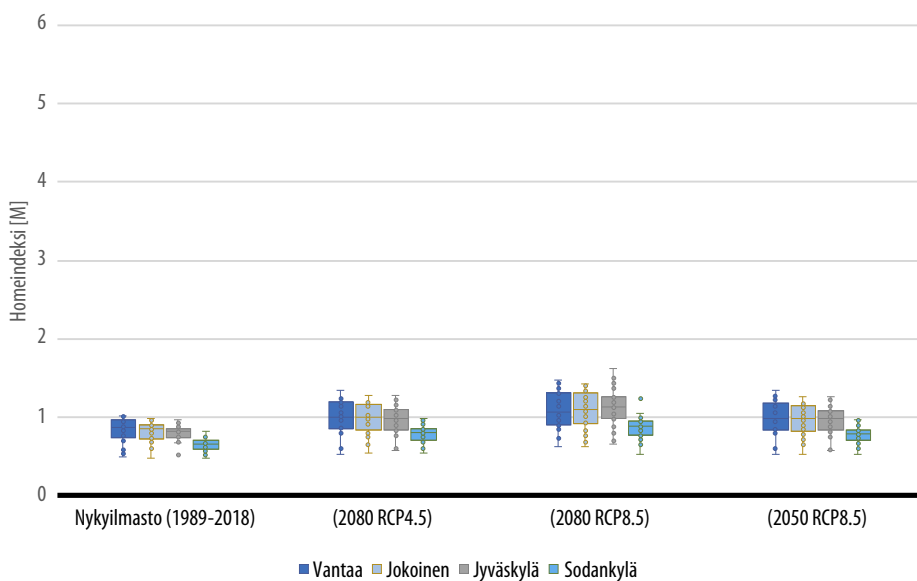
Lämmöneristepaksuudella BSW-rakenteissa ei ollut tulosten perusteella merkittävää vaikutusta rakenteiden homehtumisherkyyteen. Sen sijaan betonin vedenimuominaisuuksilla vaikutus maksimihomeindekseihin on selkeä.

Kuvissa 3.6 ja 3.7 on esitetty edellisen rakenteen maksimihomeindeksit eristeen ulkopinnan tarkastelupisteessä Vantaan, Jyväskylän, Jokioisen ja Sodankylän alueella nykyilmastossa, skenaarioiden RCP8.5 ja RCP4.5 vuoden 2080 ilmastossa sekä skenaarion RCP8.5 vuoden 2050 ilmastossa. Kuvassa 3.6 rakennuksen eteläjulkisivu ja kuvassa 3.7 pohjoisjulkisivu.

Kuva 3.6. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eteläjulkisivuilla eri sijainneilla ja ilmastoissa betonisandwich-rakenteisen korkea kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 90 mm ilman tuuletusuria.



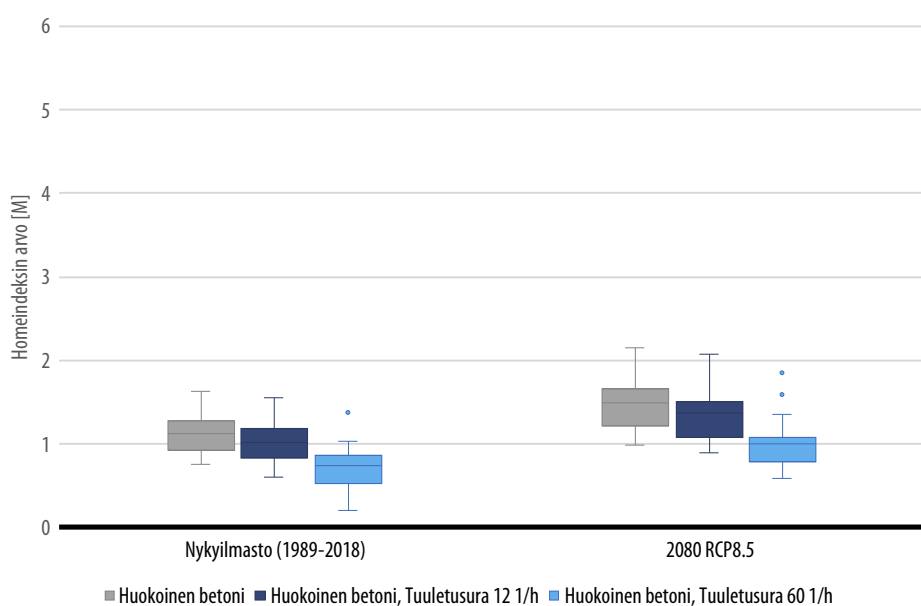
Kuva 3.7. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät pohjoisjulkisivuilla eri sijainneilla ja ilmastoissa betonisandwich-rakenteisen korkean kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 90 mm ilman tuuletusuria.



Tulosten perusteella suurimmat maksimihomeindeksit tulivat Vantaan, Jyväskylän ja Jokioisen osalta eteläjulkisivulla ja Sodankylän osalta pohjoisjulkisivulla. Suurimmat homeindeksien vuosittaiset maksimiarvojen mediaanit saatiin skenaariossa RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa Vantaalla ja Jokioisissa. Näissä tapauksissa yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien ylin 75 persentiili ylitti arvon yksi, mikä edustaa käytetyssä luokituksessa (ks. taulukko 3.7) vähäistä riskiä homeenkasvulle rakenteessa. Muissa tapauksissa riski homeenkasvulle oli erittäin vähäinen (mediaani >1) tai epätodennäköinen (mediaani <1). Sodankylän osalta jokaisessa tutkitussa variaatiossa riski homeenkasvulle rakenteessa oli epätodennäköinen (mediaani <1).

1990-luvulta lähtien betonisandwich-rakenteissa on käytetty yleisesti tuuletusuritusta ulkokuoren ja eristeen välissä (Hytönen ja Seppänen, 2009). Tuuletusurituksen vaikutusta tutkimuksessa selvitettiin toteuttamalla laskentaa BSW-rakenteelle myös siten, että rakenteeseen mallinnettiin 20x30 mm² kokoinen tuuletusuritus eristeen ulkopintaan. Urituksen ilmanvaihtuvuudelle annettiin arvot 12 l/h ja 60 l/h. Arvo 12 l/h kuvaa tilannetta, että rakenteessa on tuuletusuritus, mutta tuulettavuus on puutteellinen ja arvo 60 l/h kuvaa tilannetta, että tuuletuksen katsotaan toimivan hyvin. Kuvassa 3.8 on esitetty Vantaalla sijaitsevan huokoisella betonilla toteutetun BSW-rakenteen (eristepaksuus 250 mm) maksimihomeindeksit nykyilmastossa sekä skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa.

Kuva 3.8. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastoissa huokoisella betonilla toteutetun betonisandwich-rakenteisen korkean kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuus on 250 mm ja tuuletusuritusta on varioitu.



Hyvin tuulettuvassa rakenteessa riski homeenkasvulle rakenteessa on epätodennäköinen (mediaani <1) kummassakin tapauksessa. Tuuletusurituksen vaikutus riippuu kuitenkin urituksen toimivuudesta. Heikosti tuulettuvan urituksen osalta homeindeksin arvot olivat lähellä tuulettumattoman rakenteen arvoja.

Betonisandwich-rakenteiden homehtumisriskiä arvioitaessa keskeistä tulosten perusteella on betonin vedenimuominaisuudet sekä toimiva tuuletusuritus. Tiiviillä betonilla riski homeenkasvulle BSW-rakenteessa on tulosten perusteella epätodennäköinen. Toisaalta myös toimivalla tuuletusurituksella riski homeenkasvulle rakenteessa on epätodennäköinen, vaikka rakenteen betoni olisikin vedenimuominaisuuksiltaan voimakkaampaa. Paikkakuntakohtaisessa tarkastelussa korkeimmat homeindeksien maksimiarvot saatiin Vantaan ja Jokioisen ilmastodatoilla. Joka tapauksessa BSW-rakenteiden riski homeenkasvulle myös tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa on tulosten perusteella korkeimmillaankin vähäinen.

Tiili-villa-tiili-rakenteet

Tiili-villa-tiili-rakenteissa (TVT) laskennassa käytettiin matalan kerrostalon viistosadekerrointa 0,14 (ks. taulukko 3.3). TVT-rakenteiden yhteydessä tarkasteltiin eri aikakausien rakennuksia varioimalla eristepaksuutta ja sisäkuoren paksuutta. Vanhoissa 1960–1980-luvuilla rakennetuissa TVT-rakenteissa käytetyt eristepaksuudet ovat vaihdelleet, minkä vuoksi suoritettiin tarkastelu usealla eristepaksuudella. Lisäksi sisäkuoren paksuus vaihtelee sen perusteella, onko kyseessä kantava vai ei-kantava seinärakenne. Kantavalle rakenteelle käytettiin sisäkuoren paksuutena 270 mm tiilikerrosta ja ei-kantavalle 130 mm tiilikerrosta. Ulkokuoren paksuutena käytettiin 130 mm tiilikerrosta jokaisessa variaatiossa. Taulukossa 3.8 on listattu 1960–1980-luvun TVT-rakenteiden variaatiot kerrospaksuuksineen.

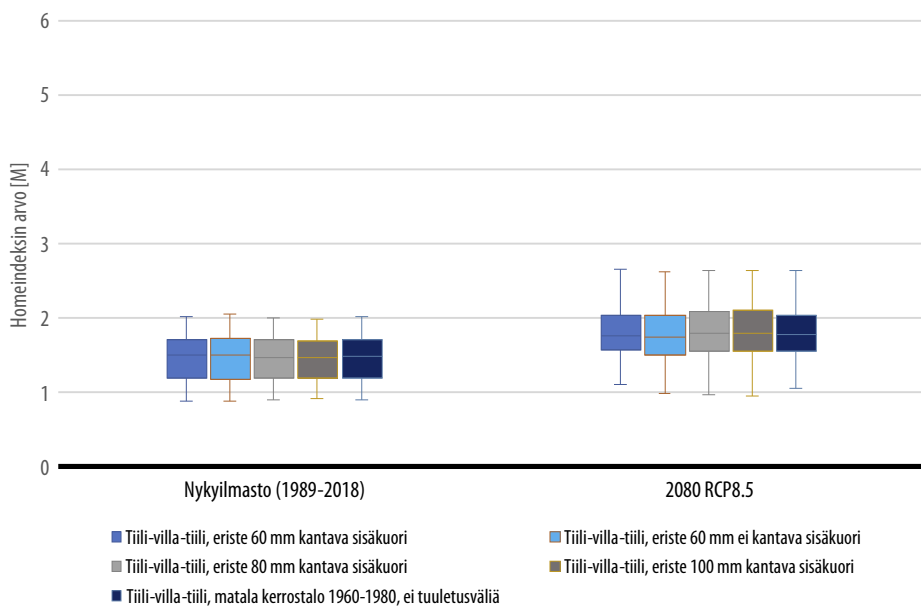
Taulukko 3.8. 1960–1980-lukujen tiili-villa-tiili-rakenteiden tyypilliset kerrospaksuudet.

Rakenne	Ulkokuori [mm]	Eriste- paksuus [mm]	Sisäkuori [mm]
Tiili-villa-tiili, eriste 60 mm, kantava sisäkuori	130	60	270
Tiili-villa-tiili, eriste 80 mm, kantava sisäkuori	130	80	270
Tiili-villa-tiili, eriste 100 mm, kantava sisäkuori	130	100	270
Tiili-villa-tiili, eriste 60 mm, ei-kantava sisäkuori	130	60	130

Uudempia TVT-rakenteita simuloivissa malleissa lämmöneristepaksuus oli 250 mm. Eristepaksuuden lisäksi tarkastelussa selvitettiin tuuletusvälin vaikutusta homeenkasvun riskille. Tuuletusväli katsottiin joko toimivaksi (ilmanvaihtuvuus 20 l/h) tai laastipurseiden täyttämäksi (ilmanvaihtuvuus 2 l/h). Kaikissa rakenteissa sisäkuoren sisäpinnalla käytettiin 12 mm tasoitekerrosta.

Kuvassa 3.9 on esitetty edellisen taulukon tuulettumattomien rakennevariaatioiden 30 vuoden maksimihomeindeksit Vantaan nykyilmaston sekä skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmaston osalta. Rakennuksena on matala kerrostalo. Kuvassa on myös yhdistetty kaikki neljä variaatiota yhdeksi tapaukseksi, joka on nimetty *Tiili-villa-tiili-rakenteiset, 1960–1980-lukujen matalat kerrostalot, ei tuuletusväliä*. Tarkastelupisteenä on eristeen ulkopinta.

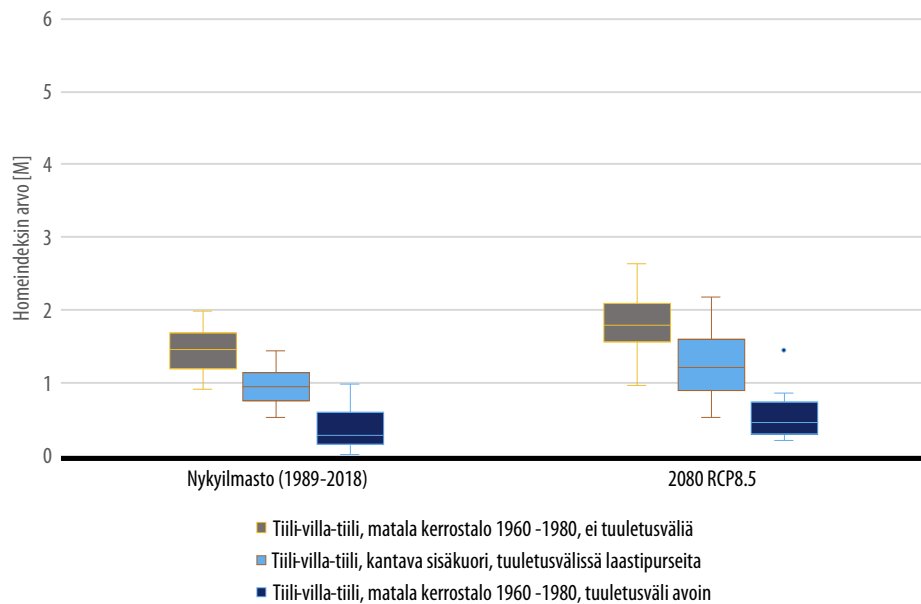
Kuva 3.9. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastoissa 1960–1980-lukujen tuulettumattomien tiili-villa-tiili-rakenteisten matalien kerrostalojen tapauksissa.



Tuloksista voidaan havaita, että sisäkuoren paksuudella tai pienillä lämmöneristepaksuuksien muutoksilla on hyvin vähäinen vaikutus homeindekseihin. Kummassakin, nykyilmastossa ja skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa matalien kerrostalojen tapauksessa tuulettumattomilla TVT-rakenteilla vuosittaisten maksimihomeindeksien ylin 75 persenttiili ylittää homeindeksin arvon 1, joka edustaa luokituksessa vähäistä riskiä homeenkasvulle rakenteessa.

Kuvassa 3.10 on esitetty 100 mm:n eristepaksuudella toteutettu kantava TVT-rakenne tuulettumattomana sekä tuuletusväiillä toteutettuna. Kuvassa on mukana tapaus, jossa tuuletusvälin katsotaan olevan avoin sekä tapaus, jossa tuuletusvälin katsotaan sisältävän laastipurseita. Tarkastelupisteenä on lämmöneristeen ulkopinta.

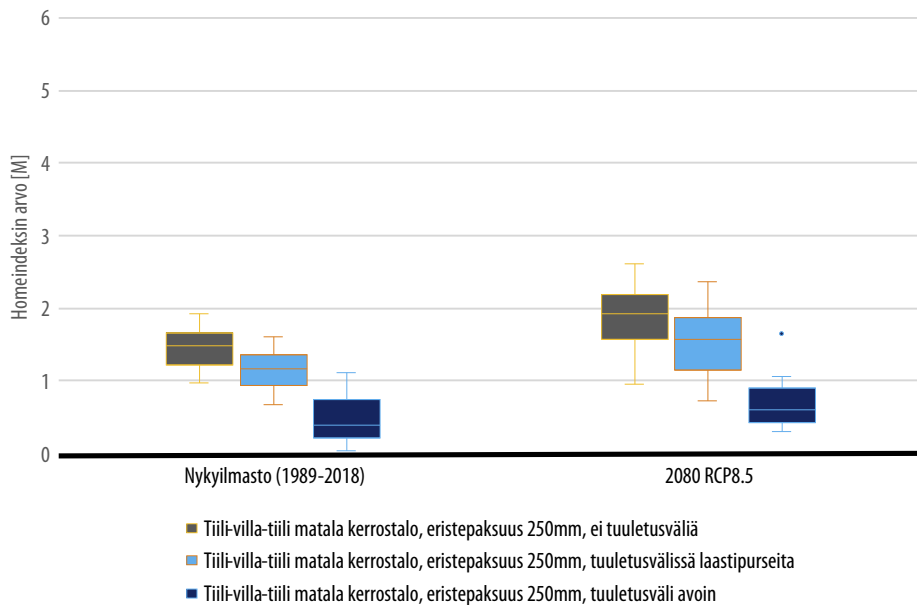
Kuva 3.10. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eteläjulkisivulla Vantaalla tiili-villa-tiili-rakenteisen 1960-1980-lukujen matalan kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 100 mm ja tuuletusvälin toimivuutta on varioitu.



Tuuletusvälin vaikutus rakenteen homeutumisherkyyteen tiili-villa-tiili-rakenteilla on tulosten perusteella merkittävä. Täysin avoimen tuuletusvälin osalta riski homeen kasvulle rakenteessa pysyy epätodennäköisenä (mediaani <1) myös skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa. Mikäli tuuletusväli on laastipurseiden täyttämä ja siten tuulettavuus on häiriintynyt, on riski homeenkasvulle rakenteessa luokituksen mukaan erittäin vähäinen (mediaani >1) ja tuulettumattomalla vähäinen (ylin 75 persentiili >1).

Kuvassa 3.11 on esitetty vastaava rakennus 250 mm:n eristepaksuudella toteutettuna. Tarkastelupisteenä on lämmöneristeen ulkopinta.

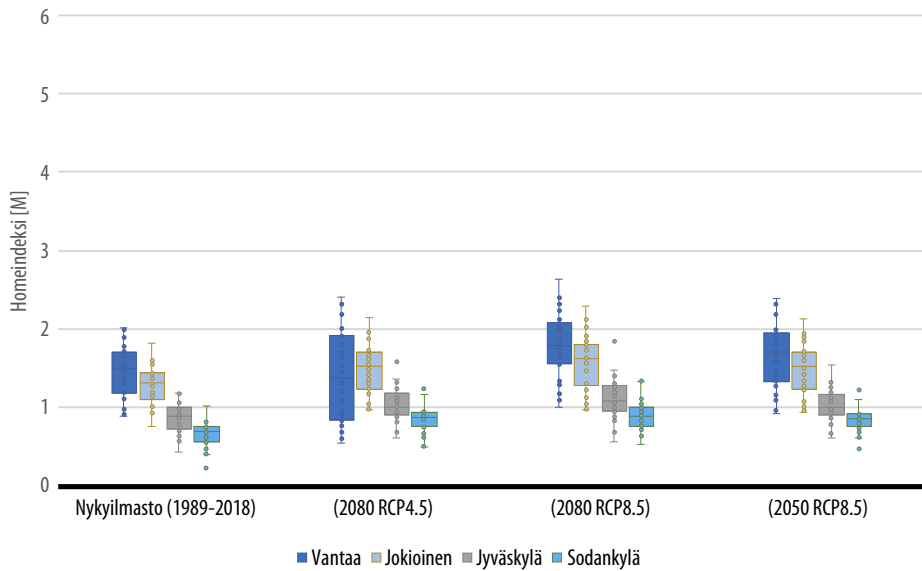
Kuva 3.11. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastoissa 1960–1980-lukujen tiili-villa-tiili-rakenteisen matalan kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 250 mm ja tuuletusvälin toimivuutta on varioitu.



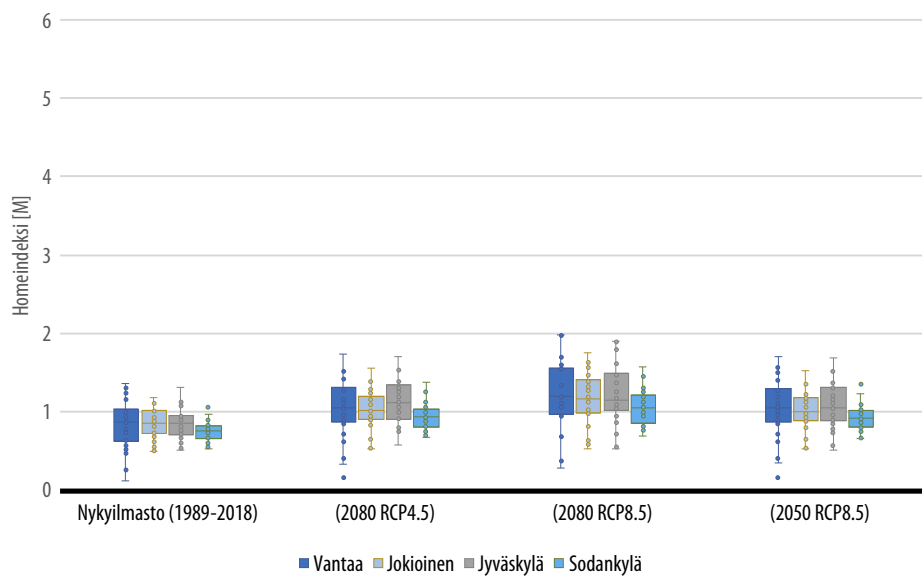
Tulosten perusteella eristepaksuuden selkeä kasvattaminen ei vaikuttanut homeindekseihin merkittävästi. Suuremmalla eristepaksuudella tuuletusvälin toimivuuden merkitys korostuu. Toimivan, avoimen tuuletusvälin tapauksessa riski homeenkasvulle rakenteessa pysyy epätodennäköisenä suurella eristepaksuudella myös tulevaisuuden ilmastossa.

Kuvassa 3.12 ja 3.13 on esitetty tuulettumattoman 60 mm:n eristepaksuudella toteutetun TVT-rakenteen maksimihomeindeksit eristeen ulkopinnan tarkastelupisteessä Vantaan, Jyväskylän, Jokioisen ja Sodankylän alueella nykyilmastossa, skenaarioiden RCP8.5 ja RCP4.5 vuoden 2080 ilmastossa sekä skenaarion RCP8.5 vuoden 2050 ilmastossa. Kuvassa 3.12 rakennuksen eteläjulkisivu ja kuvassa 3.13 pohjoisjulkisivu.

Kuva 3.12. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eteläjulkisivulla eri sijainneilla ja eri ilmastoissa tiili-villa-tiili-rakenteisen matalan kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 60 mm ilman tuuletusväliä.



Kuva 3.13. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät pohjoisjulkisivulla eri sijainneilla ja eri ilmastoissa tiili-villa-tiili-rakenteisen matalan kerrostalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 60 mm ilman tuuletusväliä.



Tulosten perusteella paikkakunta-kohtainen vaihtelu tuulettumattomilla TVT-rakenteilla eri skenaarioiden välillä on verrattain vähäistä. Vantaan, Jyväskylän ja Jokioisen osalta suurimmat homeindeksi-arvot saatiin eteläjulkisivulta skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa. Sodankylän osalta pohjoisjulkisivun homeindeksi-arvot tulevaisuuden skenaarioiden osalta muodostuivat korkeammiksi kuin eteläjulkisivulla.

Tulosten perusteella tiili-villa-tiili-rakenteiden osalta homehtumisherkkyyteen vaikuttaa merkittävimmin tuuletusvälin toimivuus. Vaikutus näkyy sekä nykyilmastossa, että tulevaisuuden ilmastossa ja korostuu entisestään suuremmilla eristepaksuuksilla.

Tiili-eriste-betoni-rakenteet

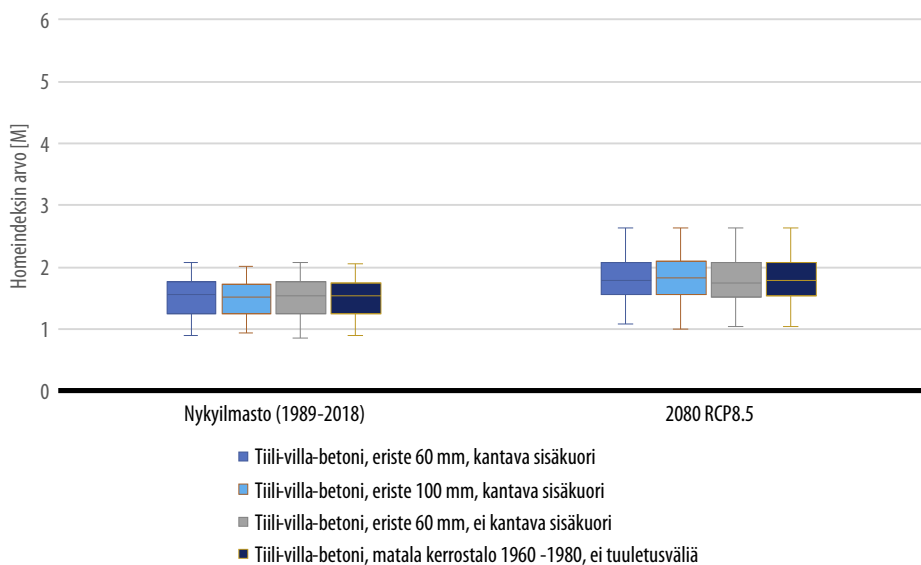
Tiili-eriste-betoni-rakenteissa laskennassa käytettiin matalan kerrostalon viistosadekerrointa 0,14 (ks. taulukko 3.3). Tiili-eriste-betoni-rakenteet mallinnettiin pääosin villaeristeellä, mutta tarkasteluun otettiin yksi polyuretaanieristeellä toteutettu rakenne. Mineraalivillalla toteutettujen rakenteiden yhteydessä rakenteissa varioitiin eristekerroksen sekä sisäkuoren paksuutta. Kantavalle rakenteelle käytettiin sisäkuoren paksuutena 150 mm:n betonikerrosta ja ei-kantavalle 80 mm:n betonikerrosta. Ulkokuoren paksuutena käytettiin 130 mm:n tiilikerrosta jokaisessa variaatiossa. Taulukossa 3.9 on listattu toteutetut variaatiot kerrospaksuuksineen. Listan rakenteista 230 mm:n mineraalivillaeristeellä ja 150 mm:n polyuretaanieristeellä toteutetut rakenteet edustavat voimassa olevien lämmöneristysmääräyksien mukaisia seinärakenteita.

Taulukko 3.9. Tyypillisiä tiili-eriste-betoni-rakenteiden kerrospaksuuksia.

Rakenne	Ulkokuori [mm]	Eriste- paksuus [mm]	Sisäkuori [mm]
Tiili-villa-betoni, eriste 60 mm, kantava sisäkuori	130	60	150
Tiili-villa-betoni, eriste 100 mm, kantava sisäkuori	130	100	150
Tiili-villa-betoni, eriste 60 mm, ei-kantava sisäkuori	130	60	80
Tiili-villa-betoni, eriste 230 mm, kantava sisäkuori	130	230	150
Tiili-PIR-betoni, eriste 150 mm, kantava sisäkuori	130	150	150

Kuvassa 3.14 on esitetty 30 vuoden homeindeksien maksimi-arvot edellisen taulukon tuuletumattomien tiili-villa-betoni-rakenneariaatioille Vantaan nykyilmaston sekä skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmaston osalta. Kuvassa on myös yhdistetty kolme variaatiota yhdeksi tapaukseksi, joka on nimetty *Tiili-villa-betoni, ei tuuletusväliä*. Tarkastelupisteenä on lämmöneristekerroksen ulkopinta.

Kuva 3.14. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastoissa tiili-villa-betoni-rakenteisen 1960–1980-lukujen matalan kerrostalon tapauksessa, kun eristekerroksessa ei ole tuuletusväliä.

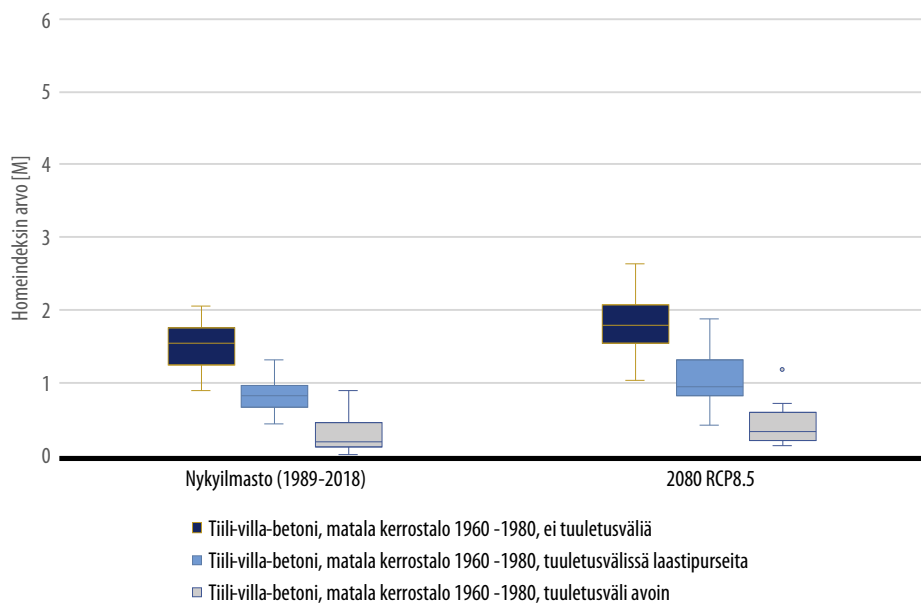


Tiili-villa-tiili-rakenteiden tapaan eristepaksuuden ja sisäkuoren paksuuden muutokset eivät merkittävästi vaikuta saatuihin homeindeksilukuihin. Eri variaatioiden väliset erot ovat erittäin pieniä samoin kuin erot nykyilmaston ja skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmaston välillä.

Tarkastelussa selvitettiin myös tuuletusvälin vaikutusta homeenkasvun riskille. Tuuletusväli katsottiin joko toimivaksi (ilmanvaihtuvuus 20 1/h) tai laastipurseiden täyttämäksi (ilmanvaihtuvuus 2 1/h).

Kuvassa 3.15 on esitetty edellisen taulukon yhdistetyn tuulettumattoman rakenteen ja 20 mm:n ilmvälillä varustettujen rakenteiden maksimihomeindeksit. Tarkastelupisteenä on lämmöneristekerroksen ulkopinta.

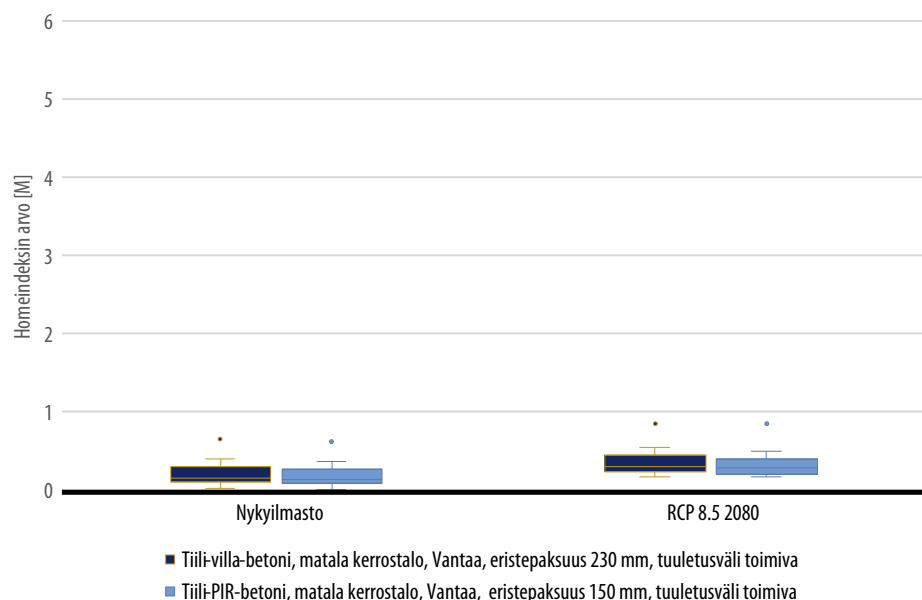
Kuva 3.15. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastoissa tiili-villa-betoni-rakenteisen matalan kerrostalon tapauksessa, kun on varioitu tuuletusvälin toimivuutta.



Tiili-villa-betoni-rakenteiden tulokset tuuletusvälin vaikutusten osalta ovat hyvin samankaltaiset kuin tiili-villa-tiili-rakenteilla. Rakenteen homehtumisherkkyden kannalta oleellisin yksityiskohta on tulosten perusteella toimiva tuuletusväli, mutta jo puutteellisella tuuletuksella on alentava vaikutus rakenteen homehtumisherkkyteen verrattuna tuulettumattomaan rakenteeseen. Tuulettumattoman rakenteen riski homeenkasvulle on sekä nykyilmastossa että skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa vähäinen (75 ylin persentiili >1). Tuuletusvälillä varustetun rakenteen osalta riski homeenkasvulle on epätodennäköinen (mediaani <1), vaikka tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus olisi häiriintynyt laastipurseista.

Tiili-villa-betoni-rakenteiden osalta tutkittiin myös uusien lämmöneristemääräysten mukaisella eristepaksuudella toteutettuja rakenteita. Kuvassa 3.16 on esitetty 30 vuoden homeindeksien vuosittaiset maksimiarvot Vantaan nykyilmaston sekä skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmaston osalta 230 mm:n mineraalivillalla ja 150 mm:n polyuretaanieristeellä toteutetuille rakenteille. Näissä rakenteissa tuuletusvälin leveydeksi määriteltiin 40 mm ja tuuletusvälin katsottiin olevan toimiva. Tarkastelupisteenä on lämmöneristerakroksen ulkopinta.

Kuva 3.16. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastoissa tiili-villa-betoni- ja tiili-PIR-betoni-rakenteisten matalien kerrostalojen tapauksissa, kun tuuletusväli on oletettu toimivaksi.

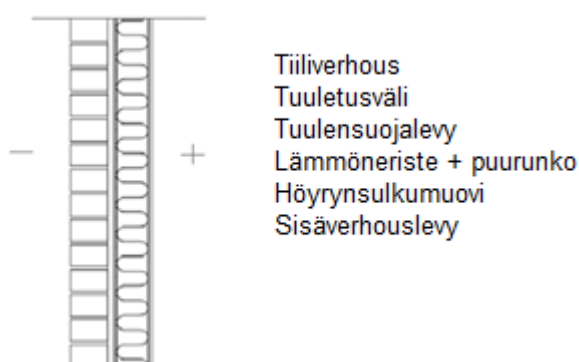


Uusien lämmöneristemääräysten mukaisten tiili-eriste-betoni-rakenteiden osalta riski homeenkasvulle rakenteessa on tulosten perusteella epätodennäköinen sekä nykyilmastolla että skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa.

Tiili-puurunko-rakenteet

Tiilipintaisissa puurunkorakenteissa laskennassa käytettiin pientalon viistosaderrointa 0,07 (ks. taulukko 3.3). Tiili-puurunko-rakenteiden tarkastelussa tutkittiin materiaalien homehtumisherkkyyden vaikutusta rakenteen homehtumisriskille. Kuvassa 3.17 on esitetty leikkauskuva tiiliverhotun puurunkoisen rakenteen perustapauksesta materiaali-kerroksineen.

Kuva 3.17. Tiiliverhotun puurunkoisen rakenteen perustapauksen leikkaus.

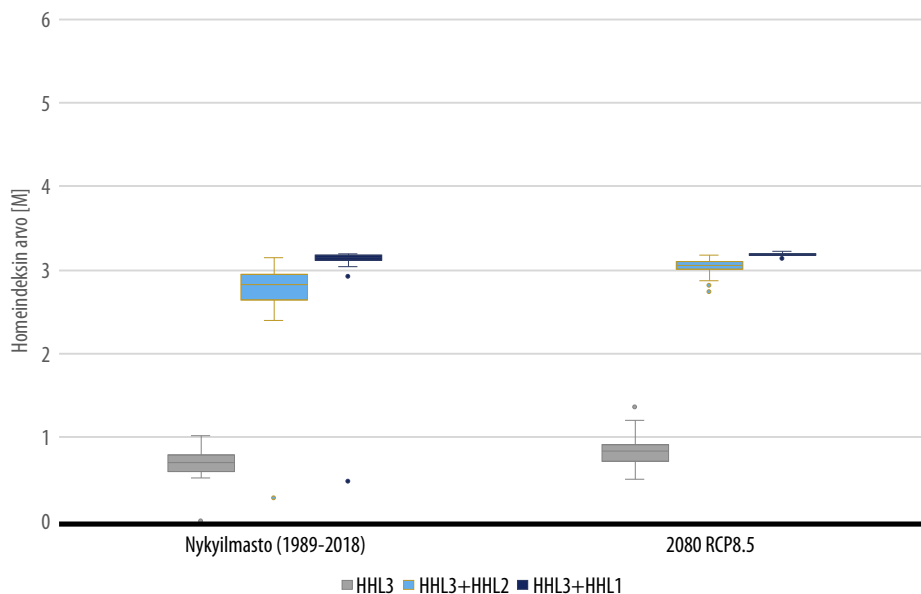


Tarkastelussa varioitiin lämmöneristepaksuutta sekä tuuletusvälin toimivuutta. Lisäksi tiili-puurunko-rakenteiden tarkastelussa tutkittiin materiaalien homehtumisherkkyyden vaikutusta rakenteen homehtumisriskille, sillä kyseisessä rakenteessa voidaan käyttää materiaaleja, joille tulee käyttää suomalaisessa homemallissa toisistaan poikkeavia homehtumisherkkyyden luokkia (HHL, ks. taulukko 3.5). Homehtumisherkkyyden luokilla on suuri vaikutus mallin avulla saataviin homeindeksin arvoihin.

Kun tutkitaan rakenteen homehtumisherkkyyttä kahden materiaalin välisessä rajapinnassa (tässä tapauksessa tuulensuojalevy ja lämmöneriste), tutkittavan materiaalin homeen maksimimäärä määräytyy kyseisen materiaalin homehtumisherkkyyden mukaan ja homeen kasvunopeus määräytyy rajapinnan materiaaleista herkemman mukaan. Seuraavissa kuvissa on tutkittu eristeenä toimivan mineraalivillan homehtumisherkkyyttä.

Suomalaisen homemallin perusteella mineraalivillalle käytetään homeutumisherkkyyssluokkaa HHL3. Tuulensuojalevyn homeutumisherkkyyssluokka ei välttämättä ole sama kuin mineraalivillan. Kuvassa 3.18 on esitetty homeindeksit Vantaan nykyilmastossa ja RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa tiilimuuratun, puurunkoisen pientalon eristeen ulkopinnassa tapauksissa, joissa tuulensuojakipsille on käytetty eri homeutumisherkkyyssluokkia. Rakenteena on tiilimuurattu, puurunkoinen pientalo 100 mm eristepaksuudella ja laastipurseiden täyttämällä tuuletusvälillä. Kuvassa HHL3 kuvaa tilannetta, jossa kummankin materiaalin katsotaan kuuluvan homeutumisherkkyyssluokkaan HHL3. HHL3 + HHL2 kuvaa tilannetta, jossa tuulensuojakipsilevyn katsotaan kuuluvan homeutumisherkkyyssluokkaan HHL2. HHL3 + HHL1 kuvaa tilannetta, jossa tuulensuojakipsilevyn katsotaan kuuluvan homeutumisherkkyyssluokkaan HHL1.

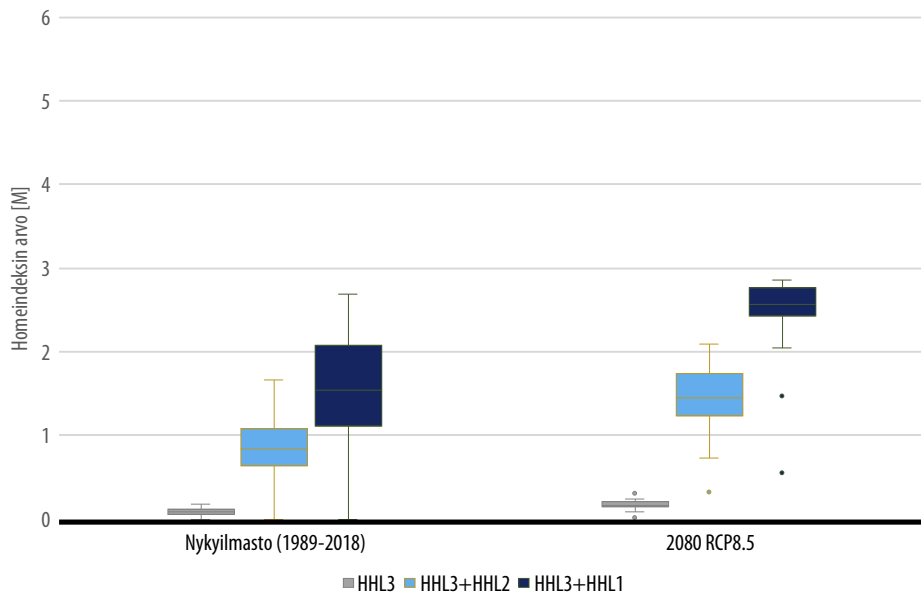
Kuva 3.18. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eristeen ulkopinnassa eteläjulkisivulla Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastossa tiilimuuratun puurunkoisen pientalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on 100 mm ja tuuletusvälissä laastipurseita.



Kuvasta havaitaan, että mikäli tuulensuojakipsilevy ja lämmöneriste luokitellaan HHL3:een pysyy homeindeksien mediaani alle yhden myös skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa ja siten riski homeenkasvulle rakenteessa käytetyn luokituksen perusteella on epätodennäköinen. Mikäli tuulensuojakipsilevy luokitellaan HHL2:een, on riski homeenkasvulle rakenteessa nykyilmastossa merkittävä (ylin 75 persentiili >2) ja tulevaisuuden ilmastossa erittäin merkittävä (mediaani >3). Mikäli tuulensuojakipsilevy luokitellaan HHL1:een on riski homeenkasvulle rakenteessa erittäin merkittävä myös nykyilmastossa.

Kuvassa 3.19 on esitetty aiempi rakenne siinä tapauksessa, että tuuletusväli katsotaan avoimeksi.

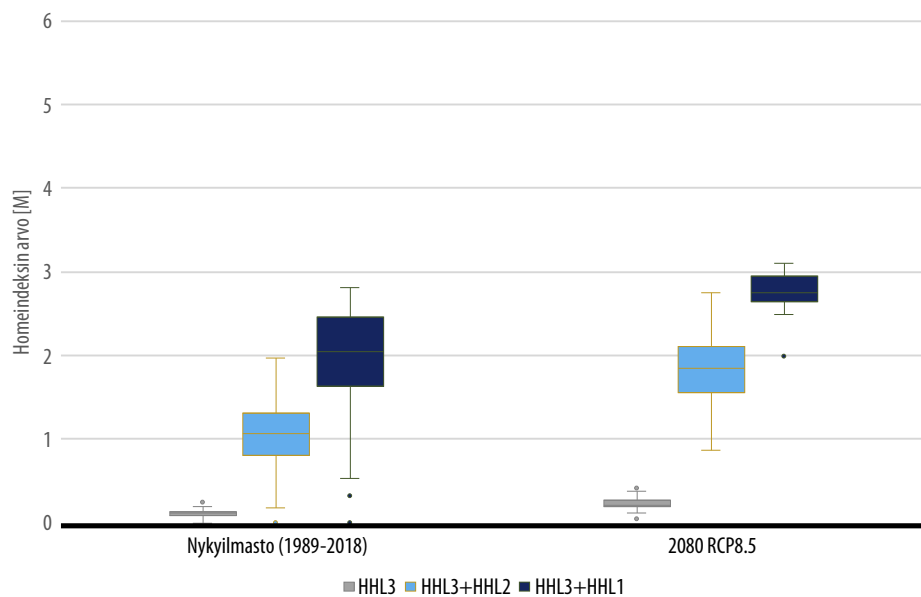
Kuva 3.19. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eristeen ulkopinnassa eteläjulkisivulla Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastoissa tiilimuuratun puurunkoisen pientalon tapauksessa, eristepaksuutena on käytetty 100 mm ja tuuletusväli on avoin.



Toimivalla tuuletusvälillä homeindeksit laskevat erityisesti HHL3 + HHL2 osalta. Nykyilmastossa riski homeenkasvulle on kyseisessä tapauksessa erittäin vähäinen (mediaani <1) ja skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa vähäinen (ylin 75 persenttiili >1). HHL3 + HHL1 rakenteen osalta riski homeenkasvulle rakenteessa on vähäinen nykyilmastossa ja merkittävä skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa.

Kuvassa 3.20 on esitetty homeindeksit edellisen, avoimen tuuletusvälin rakenteen osalta lämmöneristepaksuudella 200 mm.

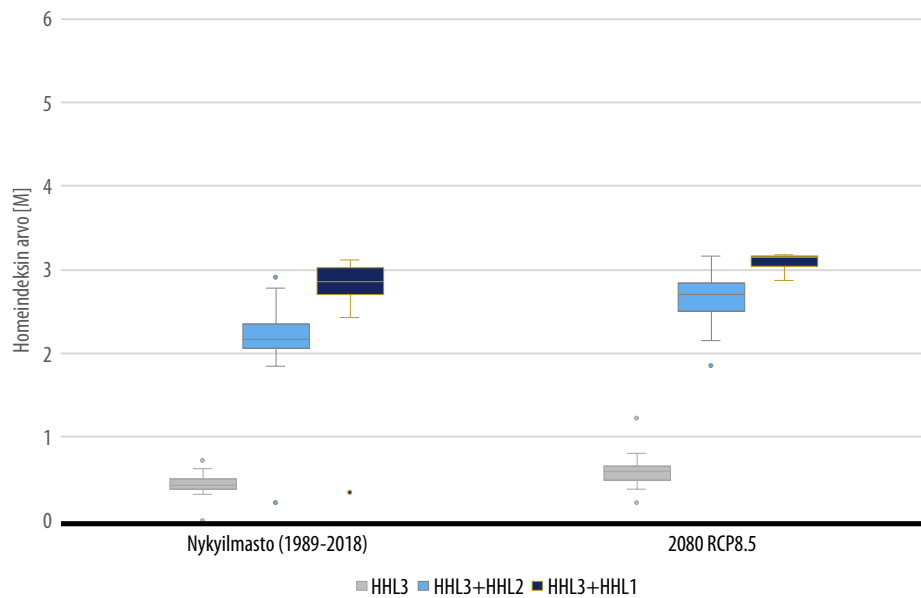
Kuva 3.20. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eteläjulksivulla eristeen ulkopinnassa nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastossa tiilimuuratun puurunkoisen pientalon tapauksessa, kun eristepaksuus on 200 mm ja tuuletusväli on avoin.



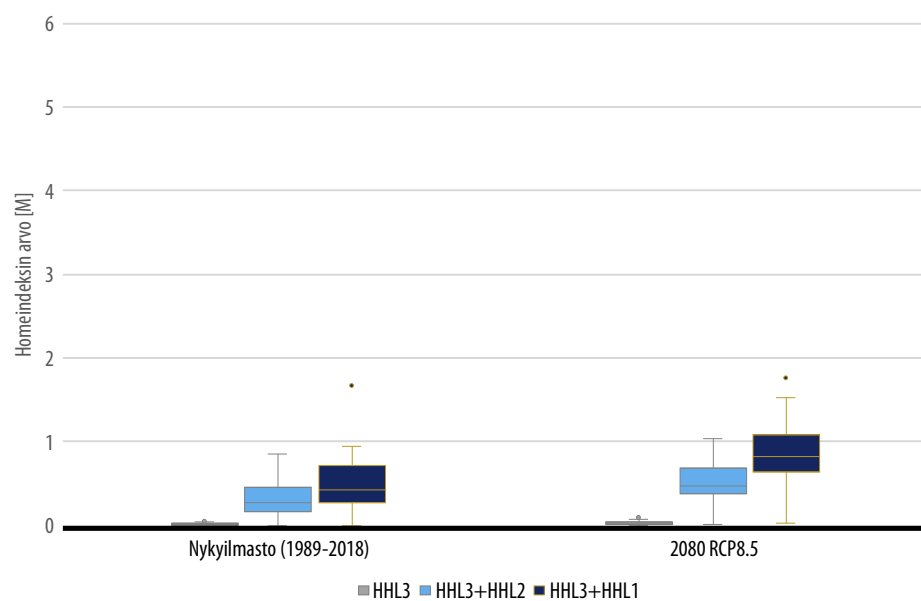
Lämmöneristepaksuuden kaksinkertaistaminen nosti saatuja homeindeksejä jonkin verran HHL3 + HHL2 ja HHL3 + HHL1 tapauksissa. HHL3 + HHL2 osalta riski homeenkasvulle nykyilmastossa on erittäin vähäinen nykyilmastossa ja vähäinen skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa. HHL3 + HHL1 osalta riski nykyilmastossa on kohtalainen ja merkittävä skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa.

Tiilimuurattujen, puurunkoisten rakenteiden yhteydessä tutkittiin myös rakennevariaatiota, jossa tuulensuojakipsilevyn ulkopinnassa on 30 mm tuulensuojavillakerros. Kuvissa 3.21 ja 3.22 on esitetty maksimihomeindeksit 200 mm eristepaksuuden rakenteissa, joissa on em. tuulensuojavillakerros. Kuvassa 3.21 on esitetty rakenne laastipurseiden täyttämällä tuuletusväillä ja kuvassa 3.22 avoimella tuuletusväillä.

Kuva 3.21. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eristeen ulkopinnassa Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastossa tiilimuuratun puurunkoisen pientalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 200 mm + 30 mm tuulensuojavilla ja tuuletusvälissä on laastipurseita.



Kuva 3.22. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eteläjulkisivulla eristeen ulkopinnassa Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastossa tiilimuuratun puurunkoisen pientalon tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 200 mm + 30 mm tuulensuojavilla ja tuuletusväli on avoin.



Tuulensuojavillan vaikutus rakenteen homehtumisriskiin on merkittävä mikäli tuuletusväli katsotaan toimivaksi. Skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa riski homeenkasvulle rakenteessa on epätodennäköinen vaikka tuulensuojakipsilevy luokiteltaisiin HHL1:een.

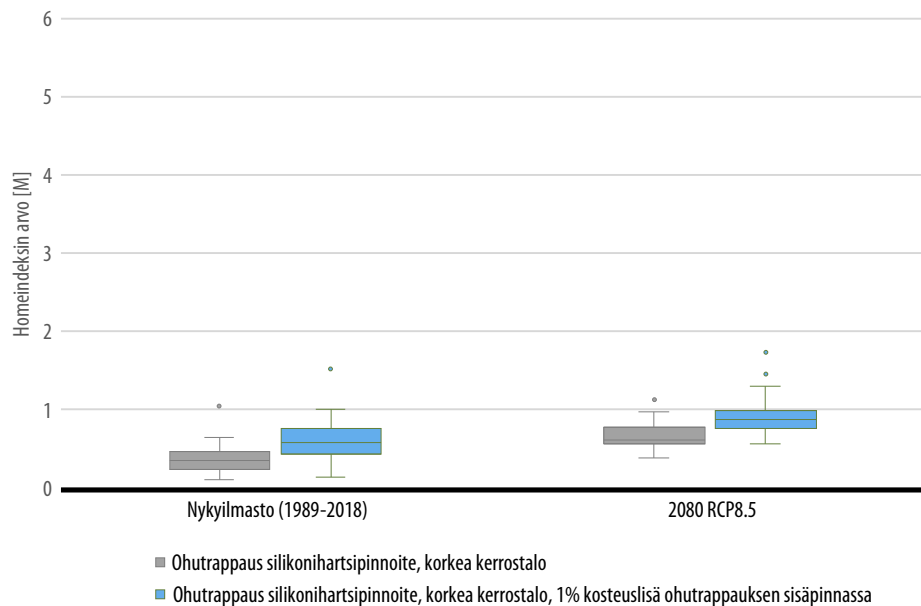
Tulosten perusteella tiilimuurattujen, puurunkoisten julkisivurakenteiden osalta homehtumisriskiin vaikuttaa merkittävimmin käytettyjen materiaalien, etenkin lämmöneristeen ulkopinnan tuulensuojan, homehtumisherkyys. Homehtumisherkillä materiaaleilla ja puutteellisella tuuletuksella riski homeenkasvulle on erittäin merkittävä jopa nykyilmastossa. Kuitenkin toimivalla tuuletuksella sekä ei-homehtumisherkillä materiaaleilla riski homeenkasvulle voi pysyä epätodennäköisenä myös tulevaisuuden ilmastossa.

Ohutrappaus-eristejärjestelmä

Ohutrappaus-eristejärjestelmien homehtumisherkyyttä tutkittiin kahdella tapauksella nykyilmastossa, sekä skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa. Toinen variaatioista katsottiin ehjäksi silikonihartsipinnoitteella toteutetuksi ohutrappaus-eristejärjestelmäksi. Toisessa variaatiossa rakenteen malliin sisällytettiin 1 % kosteuslisä rakenteen ulkopinnan sisäpuolelle kuvaamaan tilannetta, jossa osan sadevedestä ajatellaan läpäisevän pinnoitteen esimerkiksi laastikerroksen halkeilun vuoksi. Ohutrappaus-eristejärjestelmille käytettiin laskennassa korkean kerrostalon viistosadekerrointa 0,3.

Kuvassa 3.23 on esitetty tutkittujen ohutrappaus-eristejärjestelmien yksittäisten vuosien maksimihomeindeksit Vantaan nykyilmastossa ja skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa.

Kuva 3.23. 30 yksittäisen vuoden maksimihomeindeksien kertymät eristeen ulkopinnassa eteläjulkisivulla Vantaalla nyky- ja RCP8.5 2080 -ilmastossa silikonihartsinpinnoitteen ohutrappaus-eristejärjestelmän tapauksessa, kun eristepaksuutena on käytetty 200 mm.



Riski homeenkasvulle rakenteessa pysyy epätodennäköisenä myös tulevaisuuden ilmastossa (mediaani <1). 1 % kosteuslisä nostaa homeindeksejä ehjään rakenteeseen verrattuna hizeman, mutta on huomattava, että halkeilun vaikutusta sadeveden kulkeutumiseen on hankala luotettavasti arvioida.

3.1.4 Yhteenveto rakennusfysikaalisten tarkastelujen tuloksista

Tyypillisten julkisivurakenteiden homehtumisriskiä arvioitiin suorittamalla rakennusfysikaalinen mallinnus hyödyntämällä 30 vuoden ilmastodataa nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastoissa. Homehtumisriskin arvioinnissa käytetään luvussa 3.1.2 esitettyä luokittelua, joka perustuu yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien mediaaniin. Taulukossa 3.10 on esitetty käytetty luokittelu homehtumisriskille. Taulukossa 3.11 on esitetty rakenteet, joissa yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien mediaani oli yli yksi (1) nykyilmastossa tai tulevaisuuden ilmastossa. Homeindeksin arvo yksi (1) kuvaa määritelmän mukaan alkavaa homeenkasvua.

Taulukko 3.10. Tutkimuksessa käytettävä luokittelu rakenteen homeutumisherkyydestä.

Homeindeksin vuoden maksimiarvo [M] 30-vuoden tarkastelussa	Riski homeenkasvulle rakenteessa	Värikoodi
Mediaani > 3	Erittäin merkittävä	
Ylin 75 persentiili > 2	Merkittävä	
Mediaani > 2	Kohtalainen	
Ylin 75 persentiili > 1	Vähäinen	
Mediaani > 1	Erittäin vähäinen	
Mediaani < 1	Epätodennäköinen	

Taulukko 3.11. Rakenteet, joissa yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien mediaani on yli yhden (1) nykyilmastossa tai tulevaisuuden ilmastossa.

Rakenne	Nykyilmasto	Tulevaisuuden ilmast
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuoja erittäin homeutumisherkkä (HHL1)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuoja homeutumisherkkä (HHL2)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuoja erittäin homeutumisherkkä (HHL1) (suojattu tuulensuojavillalla)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuoja homeutumisherkkä (HHL2) (suojattu tuulensuojavillalla)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm tuulensuoja homeutumisherkkä (HHL1)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 100 mm tuulensuoja homeutumisherkkä (HHL1)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm tuulensuoja homeutumisherkkä (HHL2)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 100 mm tuulensuoja homeutumisherkkä (HHL2)		
Tiili-villa-tiili/betoni, matalat kerrostalot, ei tuuletusväliä		
Tiili-villa-tiili, matalat kerrostalot eristepaksuus 250 mm, tuuletusvälissä laastipurseita		
Tiili-villa-tiili, matalat kerrostalot eristepaksuus 60-100mm, tuuletusvälissä laastipurseita		
Tiili-villa-tiili, pientalot, ei tuuletusväliä		
Hyvin suurella vesihöyrynvastuksella pinnoitettu betonisandwich-rakenne ilman tuuletusuria		
Betonisandwich-rakenteet ilman tuuletusuria, vedenimuominaisuuksilta hyvin voimakkaat betonit (esim. pesubetoni)		
Betonisandwich-rakenteet heikoilla tuuletusurilla, vedenimuominaisuuksilta hyvin voimakkaat betonit (esim. pesubetoni)		
Betonisandwich-rakenteet ilman tuuletusuria, vedenimuominaisuuksilta voimakkaat betonit (esim. C20/25)		
Tuulettumaton purulla eristetty omakoti talo huonosti vesihöyryä läpäisevällä maalilla		

Suoritetun tarkastelun perusteella erityisesti puurunkoisten, tiilimuurattujen rakenteiden osalta riski homeenkasvulle on korkea, etenkin mikäli rakenteessa on käytetty homeutumisherkkiä materiaaleja ja tuuletus on puutteellinen. Homeutumisherkillä materiaaleilla ja puutteellisella tuuletusvälillä toteutetuissa tiilipintaisissa puurunkoisissa rakenteissa riski homeenkasvulle on merkittävä myös nykyilmastossa.

Taulukkoon 3.12 on koottu rakenteita, joilla maksimihomeindeksien mediaani jäi alle yhden (1) eli riski homeenkasvulle käytetyn luokittelun mukaan on epätodennäköistä.

Taulukko 3.12. Rakenteet, joissa yksittäisten vuosien maksimihomeindeksien mediaani on alle yhden (1) nykyilmastossa tai tulevaisuuden ilmastossa.

Rakenteita, joissa riski homeenkasvulle on epätodennäköinen (mediaani <1)

Betonisandwich-rakenteet, joissa vesitiivis ja vesihöyryä läpäisevä pinnoite
Betonisandwich-rakenteet, vedeniومانaisuuksiltaan tiivis tai erittäin tiivis betoni
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm, tuulensuoja kohtalaisen homeutumisherkkä (HHL3)
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 100 mm, tuulensuoja kohtalaisen homeutumisherkkä (HHL3)
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm tuulensuoja kohtalaisen homeutumisherkkä (HHL3) (suojattu tuulensuojavillalla 30 mm)
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm tuulensuoja homeutumisherkkä (HHL2) (suojattu tuulensuojavillalla 30 mm)
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm tuulensuoja erittäin homeutumisherkkä (HHL1) (suojattu tuulensuojavillalla 30 mm)
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, eristepaksuus 100 mm, tuulensuoja kohtalaisen homeutumisherkkä (HHL3)
Tiili-villa-tiili, matalat kerrostalot, eristepaksuus 250 mm, tuuletusväli avoin
Tiili-villa-tiili, matalat kerrostalot, eristepaksuus 60-100 mm, tuuletusväli avoin
Tiili-villa-tiili pientalot, tuuletusvälissä laastipurseita
Tiili-villa-tiili pientalot, tuuletusväli avoin
Puuverhoiltu omakotitalo, tuuletusväli, eristeen ulkopinnan puukuitulevy kohtalaisen homeutumisherkkä (HHL3)
Puuverhoiltu omakotitalo, tuuletusväli, eristeen ulkopinnan puukuitulevy homeutumisherkkä (HHL2)
Puuverhoiltu omakotitalo, tuuletusväli, eristeen ulkopinnan puukuitulevy erittäin homeutumisherkkä (HHL1)
Ohutrappaus-eristejärjestelmä, silikonihartsipinnoite
Ohutrappaus-eristejärjestelmä, silikonihartsipinnoite, 1 %:n kosteuslisä rappauksen sisäpinnassa

Pääosa tarkasteluista suoritettiin Vantaan ilmastossa eteläjulkisivuille. Osalle rakenteista suoritettiin laskentaa myös Jyväskylän, Jokioisen ja Sodankylän osalta, etelä- ja pohjoisjulkisivuilla. Paikkakuntaakohtaisessa tarkastelussa korkeimmat homeindeksi-arvot saatiin Vantaan ja Jokioisen eteläjulkisivuilla skenaarion RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa. Sodankylää lukuun ottamatta paikkakuntaakohtaisessa tarkastelussa eteläjulkisivuilta saadut homeindeksit olivat suurempia kuin pohjoisjulkisivuilla.

Suoritetun tarkastelun perusteella merkittävimpiä rakenteen homehtumisriskiin vaikuttavia tekijöitä ovat

- huokoisten materiaalien vedenimuominaisuudet
- rakennemateriaalien homehtumisherkkyys
- tuuletusurien /-välin olemassaolo ja toimivuus
- rakenteen alttius viistosaderasitukselle (ilmansuunta, korkeus).

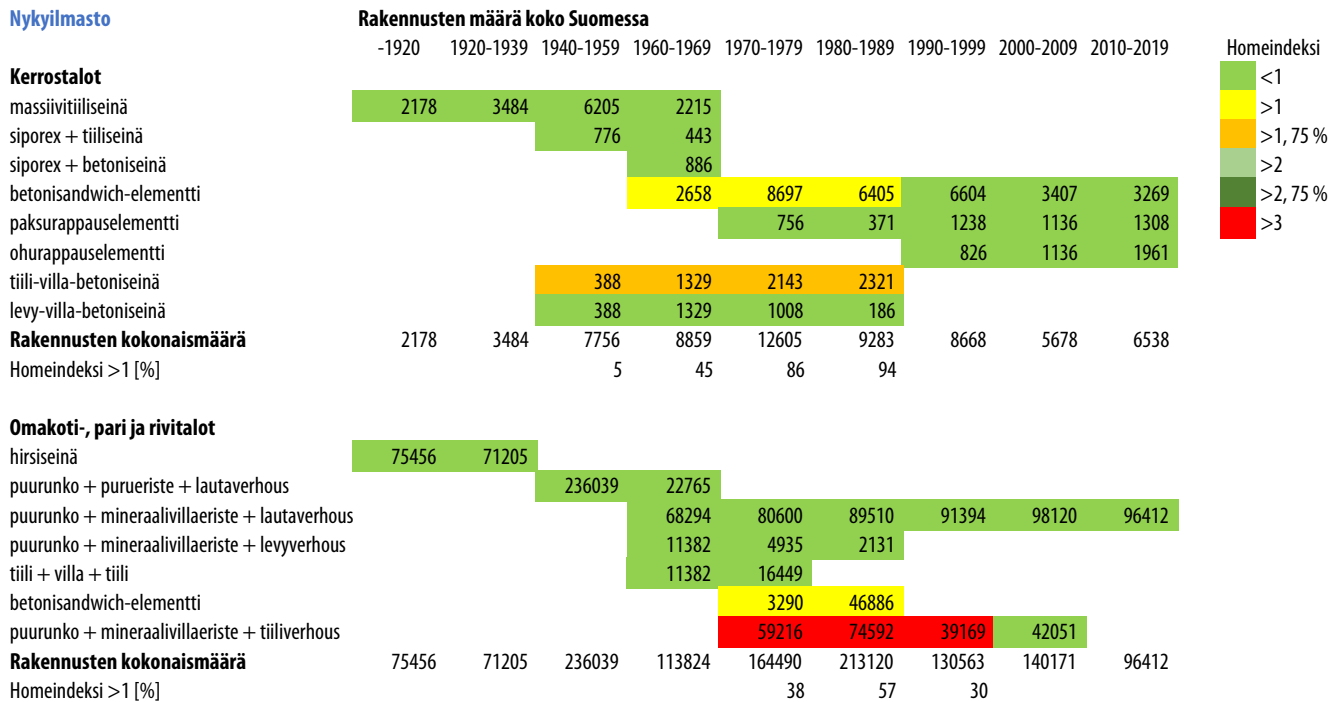
3.2 Kosteus- ja mikrobivauriot rakennuskannassa

Luvussa 3.1 tehtyjen tarkastelujen perusteella on tehty arvio Suomen asuinrakennuksissa olevien ulkoseinärakenteiden homeindeksistä ja sen muutoksesta ilmastomuutoksen seurauksena. Ilmastomuutoksen vaikutustarkastelu on tehty ainoastaan ankarimmalle skenaariolle RCP8.5 ja vuodelle 2080. Ulkoseinärakenteiden tarkastelussa omakoti-, pari- ja rivitalojen määrät on laskettu yhteen rivitalojen pienen määrän vuoksi. Asuinkerrostalot on tarkasteltu omana joukkonaan. Rakennusten lukumäärät on haettu Tilastokeskukset tiedoista (2022).

Kuvassa 3.24 on esitetty asuinrakennuskannan ulkoseinärakenteiden laskennallinen homeindeksi eri ulkoseinärakenteilla nykyilmastossa. Kuvan ulkoseinärakenteiden jakauma on laadittu Kerrostalot-kirjasarjan (Neuvonen 2006) sekä Forecon Oy:n laatiman eri julkisivumateriaalien jakauman perusteella. Kuvasta on jätetty pois harvinaisemmat ulkoseinätyypit, kuten lasi, luonnonkivi ja metallilevyt, koska niiden osuudet ovat tyypillisesti 1–2 prosentin luokkaa.

Kuva 3.24. Suomen asuinrakennuskannan homeindeksit eri ulkoseinärakenteilla nykyilmastossa vuosikymmenittäin jaoteltuna. Lukuarvot ovat rakennusten lukumääriä.

Nykyilmasto



Asuinkerrostaloissa vaurioherkimpä ulkoseinärakenteita ovat tiili-villa-betoniseinät, joiden tuuletusväli on ennen 1990-lukua ollut olematon tai hyvin pieni. Suunnitteluohjeisiin tuuletusroko on tullut vasta 1990-luvulla. Toinen seinärakenne, jossa homeindeksi ylittää 1:n on betonisandwich-elementti, jonka ulkokuoren betoni on tehty korkealla vesi-sementtisuhteella ja näin betonin tiivys on jäänyt heikoksi. Tämä näkyy myös näiden ennen 1990-lukua valmistuneiden julkisivuelementtien betonin karbonatisoitumisnopeudessa (Lahdensivu 2012). 1990-luvulla valmistuneiden sandwich-elementtien betoni on huomattavasti tiiviimpää, ja karbonatisoituminen hidasta (Lahdensivu 2022). 1990-luvulla ja sen jälkeen tiivistä betonista valmistetuissa sandwich-elementeissä ei siten viistosade pääse kastelemaan lämmöneristeitä ja homeindeksi pysyy alhaisella tasolla.

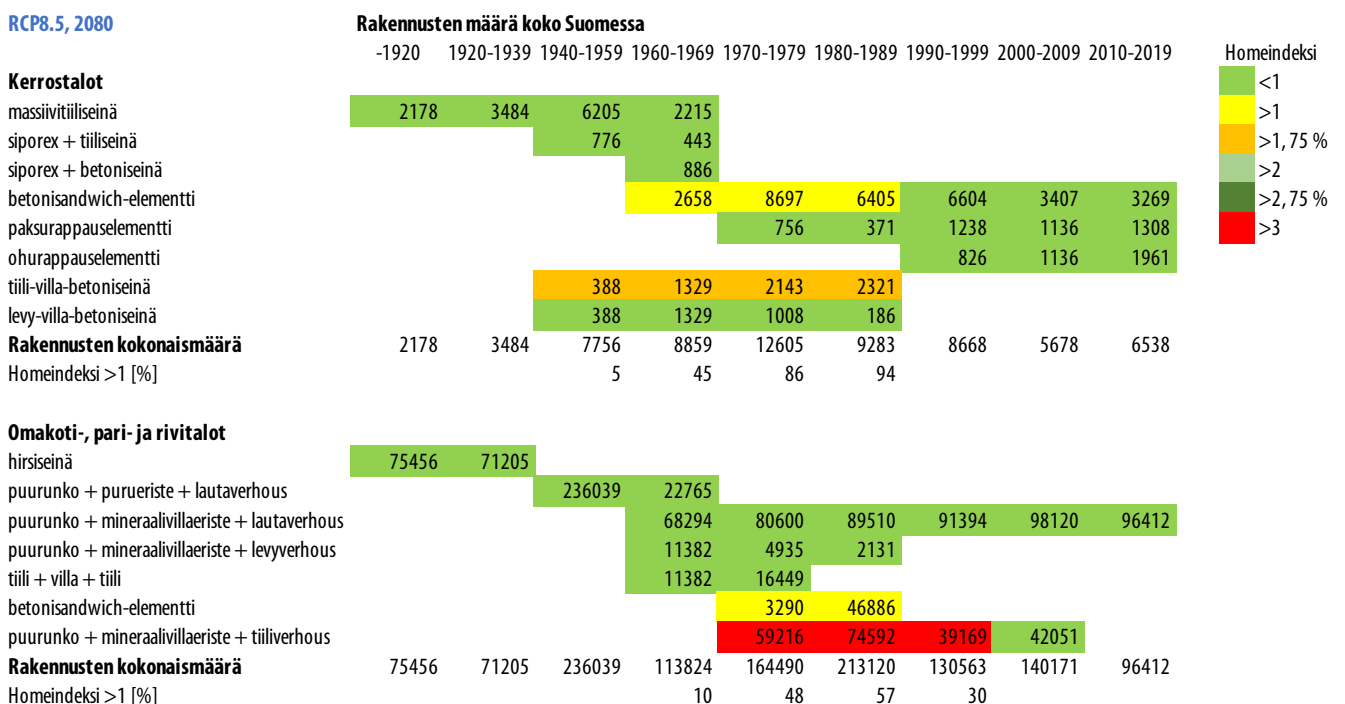
Kaikkiaan homeindeksi on koholla yhteensä 23941 asuinkerrostalossa, jos oletetaan, että koko julkisivurakenne on kuvan 3.24 mukainen. Erityisesti 1960- ja -70-lukujen asuinkerrostaloissa esiintyy erilaisia ulkoseinärakenneyhdistelmiä. Usein päädyissä on tiili-villa-betonirakenne ja rakennuksen pitkillä sivuilla betonisandwich-elementit. Näiden lisäksi esimerkiksi parvekkeiden taustaseinillä on tuohon aikaan käytetty kevyitä puurankorunkoisia seiniä sekä rakennuksen pitkillä sivuilla levy-villa-betoni-rakenteita. Yksittäisen asuinkerrostalon kohdalla onkin syytä tarkastella useamman seinärakenteen homeindeksiä, jotta voidaan arvioida ko. rakennuksen vaurioherkyyttä.

Omakoti-, pari- ja rivitalojen kohdalla selvästi vaurioherkin rakenne on tiiliverhoiltu puurunkoinen seinä. Näissä seinärakenteissa ilmarako on ohjeistettu vasta 1990-luvulla ja silloinkin osassa rakennuksia laastipurseet voivat tukkia ilmarakoa. Toinen vaurioherkkä ulkoseinärakenne on betonisandwich-elementti samasta syystä kuin asuinkerrostaloissa. Betonisandwich-elementtejä on kuitenkin käytetty varsin vähän omakoti-, pari- ja rivitaloissa verrattuna puu- ja tiilijulkisivuihin. Kaikkiaan homeindeksi on koholla 223154 rakennuksessa, jos oletetaan, että koko julkisivurakenne on kuvan 3.24 mukainen. Homeindeksi ylittää arvon 3 ainoastaan yhdellä ulkoseinärakenteella, eli muuratulla puurunkoisella seinärakenteella. Tällaisia rakennuksia on yhteensä 172977 kappaletta. Pientaloissa julkisivumateriaalit vaihtelevat vähemmän kuin kerrostaloissa. Tiiliverhoilluissa puurunkoisissa rakennuksissa saattaa osa julkisivusta olla lautaverhoiltua.

Ankarimmalla RCP8.5-skenaariolla ilmastonmuutos nostaa asuinkerrostaloissa betonisandwich-elementin homeindeksiä, mutta kokonaisuutena koholla olevien homeindeksien määrä on asuinkerrostaloissa täsmälleen sama kuin nykyilmastossa, ks. kuva 3.25. Pientaloissa merkittävin muutos on tiili-villa-tiili-rakenteen homeindeksin nousu yli yhden. Tämä lisää sellaisten rakennusten määrää 27831:llä, joissa homeindeksi on koholla. Kaikkiaan näitä on tällä skenaariolla 200808 kappaletta.

Kaikkiaan muutokset RCP8.5-skenaariolla nykyilmastoon verrattuna ovat pieniä. Ne ulkoseinärakenteet, joissa homeindeksi on koholla jo nykyilmastossa kärsivät tulevaisuuden ilmastosta eniten.

Kuva 3.25. Suomen asuinrakennuskannan homeindeksit eri ulkoseinärakenteilla skenaariolla RCP8.5 vuodelle 2080 vuosikymmenittäin jaoteltuna. Lukuarvot ovat rakennusten lukumääriä.



3.3 Rakenteiden säilyvyys muuttuvassa ilmastossa

Olemassa olevien betonijulkisivujen ja -parvekkeiden säilyvyysominaisuuksia sekä vaurioitumista nykyilmastossa on tarkasteltu Lahdensivun (2012) väitöskirjassa. Lisäksi Pakkalan (2020) väitöskirjassa tarkasteltiin tarkemmin sääolosuhteiden ja vaurioitumisen yhteyttä sekä ilmastomuutoksen vaikutusta kyseisiin, betonirakenteille kriittisiin sääolosuhteisiin. Olemassa olevien, säälle alttiiden betonirakenteiden merkittävimmät vauriomekanismit Suomessa ovat olleet betonin pakkasrapautuminen ja raudoitteiden korroosio. Tutkimusten perusteella olemassa olevassa betonirakennuskannassa on runsaasti laadullisia puutteita, joiden määrä ja merkittävyys riippuu rakentamisajankohdasta ja sen aikaisten määräysten tasosta. Lähes nykytasoa vastaavat vaatimukset muun muassa käytetyn betonin lujuusominaisuuksille sekä pakkasenkestoa lisäävälle suojuhuokostukselle ovat olleen käytössä vuodesta 1990 lähtien ja raudoitteiden peitepaksuuksille jo vuodesta 1978 lähtien, mutta vielä vuoden 1990 jälkeen rakennetuissa rakennuksissa on havaittu huomattavan paljon puutteita määräyksiin nähden. Kuitenkin edellä mainittujen tutkimusten perusteella nykyvaatimusten mukaisesti toteutetut, säälle alttiit betonirakenteet saavuttavat käyttöikävaatimuksensa myös tulevaisuuden ilmastossa.

Pakkalan väitöstutkimuksen (2020) ja RAMI-hankkeessa (Laukkarinen ym. 2022) tehtyjen päivitettyjen arvioiden mukaan ilmastomuutosskenaarioiden mukaiset tulevaisuuden ilmastot nostavat rasiustasoa raudoitteiden korroosion kannalta, sillä ilman hiilidioksidipitoisuuden kasvu nopeuttaa betonin karbonatisoitumisvaihetta ja aktiivisen korroosiovaiheen kannalta kriittiset tekijät eli viistosademäärä ja lämpötilat nousevat. Vaikutus on merkittävä erityisesti vielä korjaamattomissa, nykylaatutasoa heikommassa 1960–1980-lukujen betonirakenteissa. Toisaalta RAMI-hankkeen tarkastelujen mukaan betonin karbonatisoituminen ei saavuta teräksiä edes 100 vuoden käyttöikätaivoitteella, jos toteutunut peitepaksuus on 25 mm. Lisäksi nykyrakentamisessa julkisivuelementtien ulkokuorissa käytetään ruostumatonta terästä. Pakkasrasitustaso puolestaan alenee tulevaisuuden ilmastossa nykyilmastoon nähden, mutta edellä mainituissa tutkimuksissa on osoitettu, että nykyisen kaltainen lisähuokostus vaaditaan edelleen myös tulevaisuuden ilmastossa.

Lahdensivu (2010) on arvioitunut myös muiden kuin betonisten julkisivurakenteiden kestävyyttä muuttuvassa ilmastossa. Vesi on mukana lähes kaikissa vauriomekanismeissa, minkä vuoksi kasvava vetenä tulevan sateen määrä vaikuttaa merkittävästi kaikkien säälle alttiiden rakennusmateriaalien säilyvyyteen. Pakkasrapautuminen on tyypillinen vauriomekanismi myös muilla huokoisilla, kiviainespohjaisilla säälle alttiilla materiaaleilla, kuten erilaisilla tiilillä, harkoilla ja niiden muurauslaasteilla sekä rappauksilla. Erityisesti kuorimuurirakenteissa käytettävillä tiilillä ja huokoisilla harkoilla rasiustaso saattaa kuitenkin nousta betonia merkittävämmiin, sillä niiden vedenimukyky on betonia suurempi ja siten pakkasrapautumalle altistava kosteusmäärä huokosissa kasvaa. Siten myös rasiustason muutokset vaikuttavat niiden säilyvyyteen vastaavasti kuin betonilla. Tiilten

ja muurauslaastien pakkasenkesto-ominaisuudet ovat parantuneet, kuten betonillakin 1980-luvulta lähtien, kun rakennustuotteiden valmistuksen laatu on tasaantunut ja huokostukseen on kiinnitetty enemmän huomiota. Erityisesti ennen 1980-lukua muurauslaastit eivät olleet tehdasvalmisteisia vaan niitä valmistettiin työmaalla hiekasta ja muuraussementistä, mikä on aiheuttanut niiden laadun suurta vaihtelua. Tiilikuorimuurirakenteissa on siirrytty laajamittaisesti ruostumattomien raudoitteiden käyttöön vasta 1990-luvulla, joten sitä ennen toteutetuilla kuorimuurirakenteilla raudoitteiden korroosioriski on sidoksissa sademäärään ja siten kasvaa tulevaisuuden ilmastossa. Kuorimuurin sidonnassa on käytetty ruostumattomia sidontamateriaaleja jo aiemmin, mutta niissäkin vaihtelu on suurta. Laastisaumassa sijaitsevien raudoitteiden korroosioriskiä lisää myös se, että kyseiset raudoitukset ovat usein melko lähellä pintaa ja niitä suojaavan muurauslaastin alkalisuus häviää karbonatisoitumisen seurauksesta melko nopeasti. 1990-luvulla rakennetuissa kuorimuureissa säilyvyyteen on kiinnitetty enemmän huomiota ja niissäkin on oletettavaa, että nykyvaatimustasolla voidaan saavuttaa haluttu käyttöikä myös tulevaisuuden ilmastossa.

Kvande ja Lisø (2009) ovat tarkastelleet muurattujen rakenteiden rasitustasoon pohjautuvaa alueellista suunnittelua Norjassa. Heidän mukaansa tärkeintä kestävyyskannalta on huolellinen suunnittelu ja toteutus, joilla vältetään saderasituksen kertyminen rakenteisiin sekä sen varmistaminen, että rakenteessa on erikseen sekä sadetta kestävä että tuulenpitävä kerros. Lisäksi he suosittelivat, että tuulettuvan kuorimuurin tapauksessa tulee olla vähintään yksi tuuletusrako / metri ja alueilla, joilla viistosadetta tulee yli 400 mm/vuodessa kaksi tuuletusrakoa / metri. Lähes vastaavalla menetelmällä viistosaderasitustasoa nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa eri alueilla Suomessa on tarkasteltu Pakkalan (2020) väitöskirjassa sekä RAMI-hankkeen (Laukkarinen ym. 2022) yhteydessä. Kyseisten laskelmien perusteella Suomessa viistosaderasitustaso on nykyilmastossa yli 400 mm/vuodessa rannikolla ja eteläisessä sisämaassa, mutta alle kyseisen rajan muilla tarkastelluilla alueilla. Sisämaassa rasitustaso nousee yli kyseisen rajan ilmastonmuutosennusteella RCP8.5 sekä vuoden 2050 että vuoden 2080 ilmastossa.

Kovalle alustalle, eli tiilen tai harkon päälle toteutetuilla rappauksilla tyypillisimmät vauriomekanismit ovat pakkasrapautumisen lisäksi muun muassa rappauksen irtoaminen alustastaan (kopo), halkeilu sekä vääränlaisesta pintakäsittelystä johtuva vaurioituminen. Kyseiset vauriomekanismit voivat johtua säärasituksen lisäksi työvirheistä, mutta niitäkin saderasitus kiihdyttää, sillä halkeilu mahdollistaa veden kulkeutumisen täyttörappaukseen tai alusrakenteeseen ja kopo-alueet tai liian tiiviistä pinnoitteesta aiheutuneet vaurioalueet voivat laajeta nopeastikin, jos taustalle pääsee kulkeutumaan halkeamien tai esimerkiksi epätiivien liitosten kautta kosteutta, joka jäätyessään laajenee. Norjassa Kvande ja Lisø (2009) suosittelivat, että alueilla, joilla viistosadetta tulee vetenä yli 200 mm vuodessa, tulee kovalle alustalle toteutetuissa rappauksissa käyttää vain kolmikerrosrappausta

ja kaksi- tai yksikerrosrappauksia tulee välttää. Suomessa kyseinen rasiustaso saavutetaan kaikilla alueilla nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa.

Eriste- ja levyrappausjärjestelmillä merkittävimmät rappauksen vauriomekanismit ovat olleet halkeilu, joka usein johtuu työ- tai suunnitteluvirheistä sekä pakkasrapautuminen, joka on ollut seurausta toimimattomasta järjestelmästä sekä runsaasta halkeilusta (Lemberg 2019). Myös eriste- ja levyrappausten kannalta pakkasrasituksen aleneminen parantaa niiden säilyvyyttä, mutta toisaalta lisääntyvä saderasitus voi lisätä halkeilun kautta rakentamiseen päätyvän kosteuden määrää ja nostaa siten vaurioriskiä. Kvande ym. (2018) tutkivat ohutrappaus-eristejärjestelmien toimivuutta Norjan ilmastossa ja päätyivät jaottelemaan Norjan viistosaderasituksen perusteella kolmeen alueeseen, joista alimman rasiustason alueilla eristerappauksia on turvallista käyttää, keskitasolla ei ole suositeltavaa käyttää ja kovimman rasiustason alueella ei tule käyttää. Keskimmäisen luokan alueilla ohutrappaus-eristejärjestelmissä tulee ottaa järjestelmän vedenpitävyys erityisesti huomioon sekä suunnittelussa että toteutuksessa eikä rappauksessa saa olla halkeilua tai muita vedenkulkureittejä taustalle. Suomessa viistosaderasiustaso saavuttaa keskimmäisen luokan (ei ole suositeltavaa käyttää) rannikolla sekä eteläisessä sisämaassa nyky- ja kaikilla tarkastelluilla tulevaisuuden ilmastoilla. Sisämaassa rasiustaso nousee kyseiseen luokkaan ilmastonmuutosennusteella RCP8.5 sekä vuoden 2050 että vuoden 2080 ilmastossa.

Taulukko 3.13. Keskimääräiset vuotuiset viistosademäärät (vetenä) eri sijainneilla nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa. Keltaisella on merkitty määrät, jotka ylittävät 400 mm/vuosi, jota on pidetään Norjassa rajana a) kuorimuurin tuuletusaukkojen lisäämisen tarpeelle (Kvande ja Lisø 2009) sekä b) ohutrappaus-eristejärjestelmän käytön suositukselle (Kvande ym. 2018), ks. ed. kappaleet.

Sijainti	Nyky-ilmasto [mm/vuosi]	2050 [mm/vuosi]			2080 [mm/vuosi]		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Rannikko	583	635	646	676	638	668	729
Eteläinen sisämaa	445	484	497	514	487	512	551
Sisämaa	331	369	380	401	372	398	443
Lappi	227	248	262	275	251	277	313

Lahdensivun (2010) mukaan puujulkisivuilla rasiustaso nousee lisääntyvän kosteusrasituksen myötä ja liitosten sekä detaljien merkitys korostuu, jotta kosteus pysyy rakenteen ulkopuolella, ja toisaalta ääri-ilmiöiden lisääntyessä kosteutta voi tunkeutua myös syvemmälle rakenteeseen. Suojautumisessa korostuvat liitosten ja detaljien lisäksi myös riittävä huolto, varsinkin maalipinnoitteen kunnossapito. Lisø tarkasteli väitöskirjassaan (2006) Norjan puujulkisivujen vaurioitumista muuttuvassa ilmastossa ja hyödynsi puun lahoamisriski -indeksiä (Scheffer 1971). Indeksini huomioi vuotuisen keskilämpötilan sekä ne vuorokaudet, jolloin sataa vähintään 0,245 mm. Lisäksi huomioidaan maakohtainen kerroin, joka on muodostettu sen perusteella, että indeksille saadaan asteikko 0–100 eli menetelmällä saadaan hyvin yksinkertaistettu arvio rasiustasosta. Indeksini asteikon mukaan matala lahoamisriski on alueilla, jossa indeksi on alle 35, keskimääräinen alueille, jossa indeksi saa arvons välillä 35...65 ja korkea alueilla, joilla indeksi on yli 65. Hakanen (2017) teki kandidaatintyössään tarkasteluja oletuksella, että laskennassa käytettävä kerroin on sama kuin Norjassa ja hyödynsi silloin käytössä ollutta ilmastomuutoskenaariota A2, joka vastaa suunnilleen nyt hyödynnettyä RCP8.5-skenaariota. Tarkastelujen perusteella Suomi kuuluu nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa Lappia (matala lahoamisriski) lukuun ottamatta keskimääräisen lahoamisriskin alueeseen, mutta vuoden 2100 ilmastossa myös Lappi nousee keskimääräisen riskin alueeksi, kun sademäärät kasvavat ja sade tulee aiempaa enemmän sulan veden muodossa lumen sijaan. Kaikilla alueilla rasiustaso nousee tulevaisuudessa, vaikka luokka pysyisi samana.

Lasi- ja metallijulkisivujen osalta Lahdensivu (2010) arvioi, että merkittävimmät ilmastomuutoksen vaikutukset liittyvät detaljeihin ja liitosten toimivuuteen sekä ääri-ilmiöiden osalta lämpöliikkeisiin. Hyvin tummapintaisilla metallielementeillä lämpötilat voivat nousta hetkellisesti +80 °C:een tuntumaan, mikä voi aiheuttaa esimerkiksi EPS-eristeen pintaosien kutistumaa ja siten elementin käyristymistä. Metallilevyllä ja -rangoilla tulee ottaa huomioon niiden suuret lämpömuodonmuutokset mahdollistamalla liikkeet muun muassa kiinnityspisteiden väljyyden avulla. Eristyslaselementeissä tulee huomioida niiden taustan ilmatilan lämpeneminen sekä taustalla olevien materiaalien korkeiden lämpötilojen kesto sekä lämpöliikkeiden mahdollistaminen.

Kaikilla julkisivumateriaaleilla on odotettavissa pintojen levä- ja muiden kasvustojen lisääntymistä, sillä olosuhteet kasvustoille paranevat kosteusrasituksen kasvun ja lämpötilan nousun myötä. Kasvustojen muodostumisnopeuteen vaikuttavat rakenteen ulkopinnan läheisyyden kosteuspitoisuus, lämpötila ja julkisivupinnoilla oleva orgaaninen lika, johon puolestaan vaikuttavat lähistön puusto sekä muu kasvusto. Kasvustojen muodostumiselle optimaaliset olosuhteet muodostuvat, kun huokoisen materiaalin kosteuspitoisuus on yli 80 % ja lämpötila 15...30 °C. Kasvustot aiheuttavat lähinnä esteettistä haittaa, mutta niiden laaja kertyminen pinnoille voi myös heikentää kuivumista ja pitää huokoista pintarakennetta kosteana siten altistaen sitä muun muassa pakkasrapautumiselle.

3.4 Tulvien aiheuttamat riskit rakennuksille

Tulvat voidaan jakaa kolmeen eri tulvatyyppiin: hulevesi-, vesistö- ja merivesitulviin. Tulvatyypit riippuvat tulvan syntytavasta, jolloin ilmastonmuutoksen vaikutukset vaihtelevat tulvatyypeittäin.

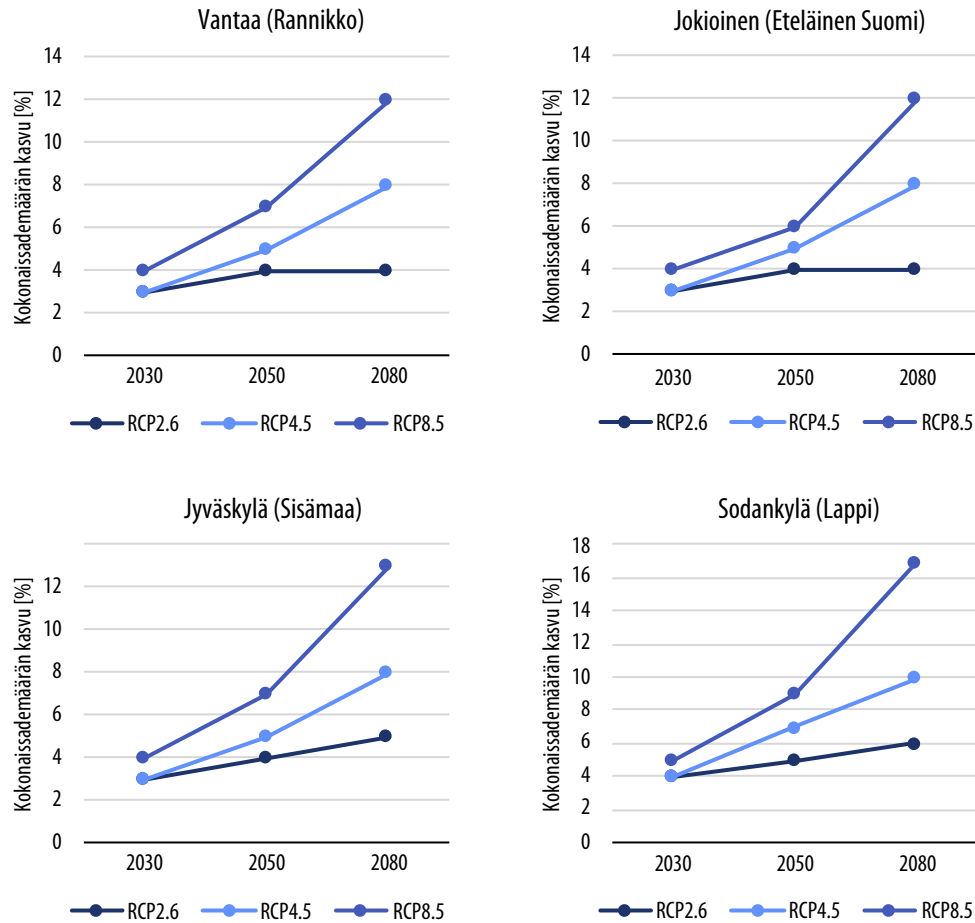
3.4.1 Hulevesitulvat

Hulevesitulvat syntyvät rankkasateiden tai lumien sulamisvesien seurauksena, kun viemäriverkostot tai avo-ojat eivät poista vettä riittävän nopeasti. Vettä läpäisemättömät pinnat, kuten asfaltti ja rakennusten katot lisäävät hulevesitulvariskiä vähentämällä veden imeytymistä maahan ja lisäämällä valuntaa. (Parjanne ym. 2018)

Yhtenä suurimpana tulevaisuuden tulvariskien suorana vaikutuksena arvioidaan olevan hulevesitulvien aiheuttamat ongelmat, joita ovat rakennusten ja laitteiden kastumiset sekä erilaisten palveluiden, liikenteen, tiedonsiirron ja energiahuollon katkokset (Parjanne ym. 2018). Taajama-alueiden lisäksi pienten valuma-alueiden tulvatilanteet voivat pahentua etenkin kesäisin, jos rankkasateet kasvavat keskimääräisiä sateita enemmän (Veijalainen ym. 2012). Rakennusten kastumisen sekä muiden ongelmien lisäksi jokitormiin johdetut hulevedet voivat aiheuttaa maakerrosten eroosiota ja syöpymistä, jotka lisäävät sortumien ja vyörymien riskiä (Parjanne & Huokuna 2014).

Rakennusten kastuminen hulevesitulvien seurauksena keskittyy lähinnä kaupunkialueille ja niiden ydinkeskustaan läpäisemättömien pintojen takia. Hulevesitulvien osalta suunnittelu- ja hallintavastuu on kunnilla (Laki tulvariskien hallinnasta 620/2010), minkä takia hulevesijärjestelmät vaihtelevat eri alueilla. Hulevesijärjestelmät riippuvat myös suunnittelijan valitsemista parametreista, jolloin hulevesijärjestelmien sopeutumista ilmastonmuutokseen on haastavaa tarkastella. Vuonna 2012 on julkaistu hulevesiopas (Kuntaliitto 2012), jossa on esitetty päivitetty ohjeet hulevesiviemäreiden mitoittamiseksi ilmastonmuutoksen osalta. Tämän oppaan mitoitusohjeeseen on kuitenkin ehdotettu päivitystä ilmastonmuutuskertoimeen, jonka perusteella hulevesijärjestelmät nykyisin mitoitetaan (Toivonen ym. 2021). Hulevesiverkostosta ei ole myöskään kattavia tietoja. Ilmastonmuutoksen vaikutusta kaupunkialueilla voidaan kuitenkin arvioida kokonaissademäärän muutoksella. Kuvassa 3.26 on esitetty kokonaissademäärän kasvu nykyilmastoon nähden Vantaalla, Jokioisissa, Jyväskylässä ja Sodankylässä.

Kuva 3.26. Kokonaissademäärän muutos tulevaisuuden ilmastossa eri skenaarioilla Vantaalla, Jokioisissa, Jyväskylässä ja Sodankylässä.



Kokonaissademäärä kasvaa jokaisella tarkasteltavalla alueella riippumatta ilmastomuutoskenaariosta. Suurin muutos tapahtuu Sodankylässä (Lappi), jossa kokonaissademäärä voi kasvaa noin 17 % rankimmalla skenaariolla (RCP8.5). Pienimmät muutokset tapahtuvat Vantaalla (rannikko) ja Jokioisissa (eteläinen Suomi), jossa suurin kokonaissademäärän kasvu voi olla noin 12 %. Suurin muutos sademäärän kasvussa tapahtuu vuosien 2050 ja 2080 välillä, jolloin myös hulevesitulvien voidaan arvioida kasvavan, jos tilanteeseen ei ole varauduttu.

Useiden tutkimusten mukaan tulevaisuuden sateet ovat voimakkaampia ja rankasateet lisääntyvät (Lehtonen ym. 2014). Vuosisadan lopulla myös nykyiset kerran 100 vuodessa esiintyvät rankasateet voivat toistua keskimäärin 30-40 vuodessa eli noin 3 % vuotuisella todennäköisyydellä (Mäkelä ym. 2016). Viimeaikaisessa ilmastossa keskimäärin kerran 100 vuodessa esiintyvä sade olisi vuosisadan lopulla voimakkaiden päästöjen

RCP8.5-skenaariossa jopa noin 50 % rankempi, jos kyse on tunnin aikana kertyvästä sademäärästä (Toivonen ym. 2021).

Nykyilmastossa rankkasateita esiintyy jo ajoittain eri puolella Suomea, aiheuttaen yleensä tulvia erityisesti kaupunkialueilla. Elokuussa 2022 Tampereella koettiin rankkasadetulva, joka aiheutti paikallisesti jopa 70 senttimetrin syvyisiä lätäköitä (kuva 3.27).

Kuva 3.27. Rankkasateen aiheuttama tulva Tampereen keskustassa 28. elokuuta 2022. Kuva Piritta Palokangas, Aamulehti. (Nyystilä & Palokangas 2022).



3.4.2 Vesistötulvat

Rankkasateet ja lumien sulaminen aiheuttavat hulevesitulvien lisäksi vesistötulvia lähinnä joissa ja järvissä. Vesistöiden tulvat voivat aiheutua myös järvalueiden suurista vedenkorkeuksista perättäisten märkien jaksojen seurauksena, jääpatoutumista jäiden lähdön aikaan, virtausaukkojen ja uomien tukkeutumisesta sekä alijäähtyneen veden jään patoutumisesta eli hyydetulvasta. Ilmastonmuutoksen vaikutukset vesistötulviin riippuvat tulvien syistä sekä vesistöjen sijainnista (taulukko 3.14). (Parjanne & Huokuna 2014)

Taulukko 3.14. Kerran 100 vuodessa esiintyvien vesistötulvien muutos ilmastonmuutoksen vaikutuksesta referenssijaksoon 1971–2000 verrattuna. 20 eri ilmastoskenaarion keskiarvot jaksoille 2010–2039 ja 2070–2099. '+' tarkoittaa tulvan kasvua, '-' pienenemistä ja '±' ei muutosta tai poikkeavia tuloksia eri skenaarioilla tai eri vesistöissä. (Veijalainen ym. 2012)

	2010-39	2070-99
Järvi-Suomen suuret keskusjärvet ja niiden laskujoet	+	+
Pienet latvajärvet Järvi-Suomessa	± / -	-
Lapin ja Kainuun joet	±	-
Rannikon joet - Pohjanmaa	± / -	-
Rannikon joet – Etelä- ja Lounais-Suomessa	±	±

Ilmaston lämmitessä lumen määrä vähenee, mikä tarkoittaa, että kevään sulamistulvat vähenevät. Lumen määrän väheneminen vaikuttaa erityisesti Keski- ja Itä-Suomen latva-vesistöjen sekä osan Pohjanmaan jokien tulvien pienenemiseen. Pohjois-Suomessa kevät-tulvat säilyvät kuitenkin suurimpina tulvina, kun Etelä-Suomessa tulviin eniten vaikuttava tekijä on sademäärän muutos, jolloin syksyn ja talven tulvat kasvavat suurimmiksi tulviksi. (Veijalainen ym. 2012)

Sateiden lisääntyessä sekä kevään aikaistuesssa vaikutukset näkyvät suurissa keskusjärvisä sekä niiden laskujoissa. Tulvariski kasvaa myös joissakin etelä- ja lounaisrannikon joki-vesistöissä, joissa tulvia esiintyy nykyilmastossa syksyn ja talven aikana. Tulvien arvioidaan lisääntyvän Saimaan, Vuoksen, Kokemäenjoen, Päijänteen, Kymijoen sekä Oulujoen vesistöissä. Myös Kemijoen vesistöissä arvioidaan tulvien lisääntymistä poiketen muista Lapin vesistöistä. (Veijalainen ym. 2012)

Ilmastonmuutoksen myötä hyydetulvariski kasvaa entisestään. Hyydetulvaa on tarkasteltu Kokemäenjoen osalta, jossa tulvariski kasvoi huomattavasti. Myös muualla Etelä- ja Keski-Suomessa arvioidaan hyydetulvariskin kasvavan talven virtaamien kasvaessa ja jääkannen synnyn myöhentyessä, mikä tarkoittaa erityisesti alkutalven tulvien lisääntymistä. (Veijalainen ym. 2012)

Talvien lyheneminen ja märkien jaksojen lisääntyminen johtaa korkeampiin pohjavedenkorkeuksiin talvella, kun kevään aikaistuminen ja kuivuusjaksojen piteneminen laskee loppukesän pohjavedenkorkeutta merkittävästi. Keski-, Itä- ja Pohjois-Suomessa alimmat pohjavedenkorkeudet ovat alkukevään aikana, joten talven lyheneminen nostaa alhaisimpia pohjavedenkorkeuksia entisestään. Ainoastaan Etelä- ja Lounais-Suomessa alimmat pohjavedenkorkeudet laskevat. (Veijalainen ym. 2012)

3.4.3 Merivesitulvat

Meriveden nopeat pinnannousut Itämerellä johtuvat kovista tuulista, ilmanpaine-eroista sekä Itämeren ominaisheilahtelusta, seichesta. Lähtökohtaisesti suuret merivesitulvat johtuvat useasta eri tekijästä, eivätkä aiheudu ainoastaan yhdestä edellä mainitusta tekijästä. Itämeren erottava kapea Kattegatin salmi voi vaikuttaa myös merivesitulvan kestoon pitämällä tuulen aiheuttamaa vedenpinnan nousua korkealla useita viikkoja ennen pinnan laskemista valtameren tasolle. (Parjanne ym. 2018)

Itämeren pinnannousu ilmastonmuutoksen vaikutuksesta on noin 20 % pienempää kuin maailmanlaajuinen keskiarvo, koska jäätiköiden epätasainen sulaminen sekä lämpölaajeneminen vaikuttavat Itämeren alueella enemmän kuin muualla. Etelämantereen sulaminen vaikuttaa Grönlannin mannerjäätikön sulamista enemmän, koska maankuori kohoaa vielä sulavan jäätikön lähellä. Suomessa maankohoaminen on voimakasta erityisesti Perämerellä, noin 3 mm/vuosi, joten Suomessa merenpinnan nousu on normaalia keskiarvoa pienempää. Toisaalta Suomessa lämpölaajenemisen vaikutus on normaalia hieman suurempaa. Taulukossa 3.15 on esitetty keskivedenkorkeuden muutos tulevaisuuden ilmastossa. (Kahma ym. 2014)

Taulukko 3.15. Keskimääräisen merenpinnan tason muutos vuosina 2000–2100 mareografipaikkakunnilla (Kahma ym. 2014).

Mareografi	Keskivedenkorkeuden muutos 2000–2100 (cm)			Keskivedenkorkeus vuonna 2100 (N2000, cm)		
	Alin	Paras arvio	Korkein	Alin	Paras arvio	Korkein
Kemi	-64	-25	27	-44	-5	47
Oulu	-61	-23	29	-40	-2	50
Raahe	-64	-25	27	-44	-6	46
Pietarsaari	-65	-27	25	-46	-8	44
Vaasa	-67	-28	24	-47	-9	43
Kaskinen	-59	-19	37	-39	0	56
Mäntyluoto	-50	-11	45	-31	8	64
Rauma	-42	-2	54	-24	16	72
Turku	-29	11	67	-11	29	85
Föglö	-31	9	64	-15	24	80
Hanko	-14	26	84	4	45	102
Helsinki	-8	33	90	12	53	110
Hamina	-5	36	94	16	57	115

Parhaan arvion mukaan keskivedenkorkeus nousee noin 30 cm Suomenlahdella, kun Perämerellä se vastaavasti laskee noin 25 cm paikkakunnasta riippuen. Suurimpien muutosten tapahtuessa keskivedenkorkeus voi nousta jopa yli 90 cm Suomenlahdella ja yli 24 cm Perämerellä. Taulukosta nähdään myös, että parhaan arvion mukaan Vaasassa ja sitä pohjoisemmassa maankohoaminen on suurempaa kuin merenpinnan nousu. (Kahma ym. 2014)

Merivesitulvien toistuvuus muuttuu keskivedenkorkeuden kasvaessa tulevaisuuden ilmastossa. Nykyiset kolmesti sadassa vuodessa esiintyvät tulvat tulevat esiintymään vuonna 2050 noin neljä kertaa 100 vuoden aikana ja vuonna 2100 joka toinen vuosi. Taulukossa 3.16 on esitetty eri tulvien toistuvuus tulevaisuuden ilmastossa vuosina 2010, 2050 ja 2100. (Pellikka ym. 2018)

Taulukko 3.16. Merivedenkorkeus eri toistuvuuksilla vuosina 2010, 2050 ja 2100 (Pellikka ym. 2018)

Yliittymistäajuus (tapausta/vuosi)	Vedenkorkeus (cm) N2000-järjestelmässä								
	1/20			1/50			1/100		
	Vuosi	2010	2050	2100	2010	2050	2100	2010	2050
Kemi	194	179	196	214	199	217	229	214	233
Oulu	192	179	198	211	198	218	226	213	233
Raahe	162	149	172	176	163	189	186	173	201
Pietarsaari	147	133	157	159	146	174	168	155	186
Vaasa	143	128	149	158	143	167	169	155	180
Kaskinen	140	129	160	154	143	177	164	154	190
Mäntyluoto	134	127	163	147	140	179	157	150	192
Rauma	134	130	171	146	142	188	155	152	200
Turku	137	139	187	149	151	204	157	160	216
Föglö	117	118	166	129	130	183	138	139	195
Hanko	134	142	200	146	154	217	155	163	229
Helsinki	159	168	225	174	183	243	185	194	256
Hamina	194	204	258	212	222	278	225	236	293

Vuoden 2010 toistuvuudet tulevat kasvamaan tulevaisuuden ilmastossa merkittävästi erityisesti Suomenlahdella. Kerran sadassa vuodessa esiintyvä tulva, jota käytetään suosituksena esimerkiksi sisävesialueiden alimmille rakentamiskorkeuksille, tulee kasvamaan

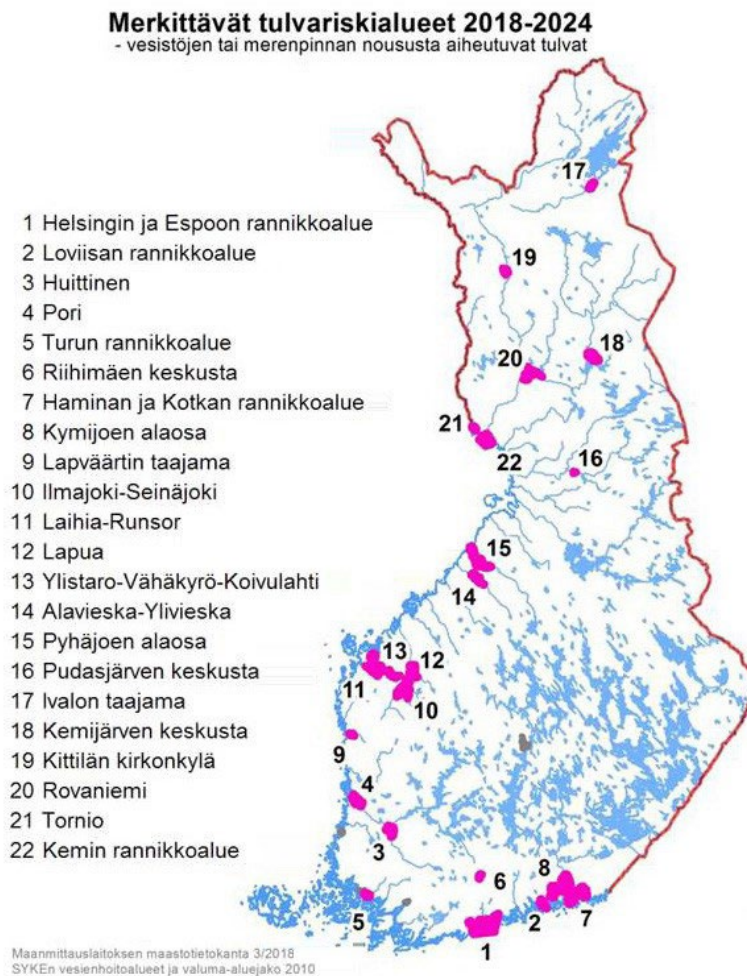
merkittävästi nykyisestä kerran sadassa vuodessa esiintyvistä tulvasta (Parjanne & Huokuna 2014). Tällä on vaikutusta erityisesti nykyisten toistuvuuksien mukaan rakennettuihin rakennuksiin, joiden rakentamiskorkeus on huomattavasti alhaisempi kuin kerran sadassa vuodessa esiintyvän tulvan vedenkorkeus tulevaisuudessa.

3.4.4 Tulville alttiit rakennukset

Rakennusmäärät

Suomessa on nimetty vuosille 2018–2024 22 merkittävää tulvariskialuetta, joista sisävesistöjen varrella sijaitsee 17 aluetta ja meren rannikolla viisi (kuva 3.28). Tulvariskialueiden nimeämisessä on otettu huomioon ilmastonmuutoksen vaikutus, aikaisemmin koetut tulvatilanteet, tarkentuneet paikka- ja muut tiedot sekä tulvariskien hallinnan toimenpiteet. (Maa ja metsätalousministeriö 2018)

Kuva 3.28. Merkittävät Suomen tulvariskialueet 2018-2024 (Vesi 2021).



Merkittävien tulvariskialueiden rakennusmääriä voidaan arvioida tulvakarttapalvelun (Tulvakeskus 2022) avulla tarkastelemalla alueita kerran tuhannessa vuodessa esiintyvällä tulvalla, jonka on arvioitu olevan kerran sadassa vuodessa esiintyvä tulva vuosisadan loppuun mennessä (Suomen ympäristökeskus (SYKE) & ELY-keskukset 2020). Merkittävien tulvariskialueiden rakennusmäärät tulvakarttapalvelusta on esitetty taulukossa 3.17.

Taulukko 3.17. Merkittävien tulvariskialueiden rakennusmäärät (Tulvakeskus 2022).

Merkittävät tulvariskialueet	Rakennusmäärä	Suhteellinen osuus [%]
Pori	4 359	27
Rovaniemi	3 422	20
Ivalo	1 798	11
Hamina	1 398	8
Helsinki	748	4
Muut*	5 109	<4
Yhteensä	17 014	

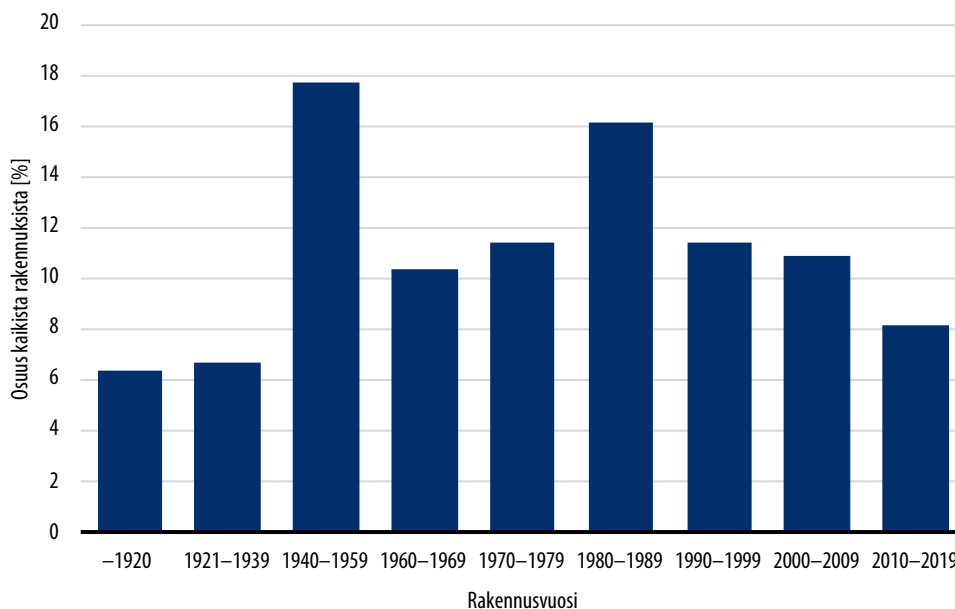
*Yksittäisten alueiden osuus

Rakennusmäärällisesti merkittävimmät tulvariskialueet ovat Pori ja Rovaniemi, joiden osuudet ovat yhteensä melkein 50 % kaikista tulvariskialueiden rakennuksista. Tulvakarttapalveluun liittyy kuitenkin epävarmuuksia, joten todelliset luvut voivat poiketa taulukon luvuista.

Rakennusvuosi

Tulville altista rakennuskantaa voidaan arvioida tarkastelemalla merkittävien tulvariski-alueiden rakennuksia. Merkittävistä tulvariskialueista voidaan valita alueet, joiden tulvariski kasvaa vuoteen 2100 mennessä edellisen luvun mukaan. Valitut alueet ovat Hamina, Helsinki, Huitinen, Kemi, Loviisa, Pori, Riihimäki ja Turku. Tarkastelemalla näitä alueita ja niiden rakennusten rakennusvuotta saadaan arvio tulvariskialueiden rakennuskannan iästä (kuva 3.29).

Kuva 3.29. Merkittävien tulvariskialueiden rakennusikäjakauma alueilla, joiden tulvariski kasvaa vuoteen 2100 mennessä.

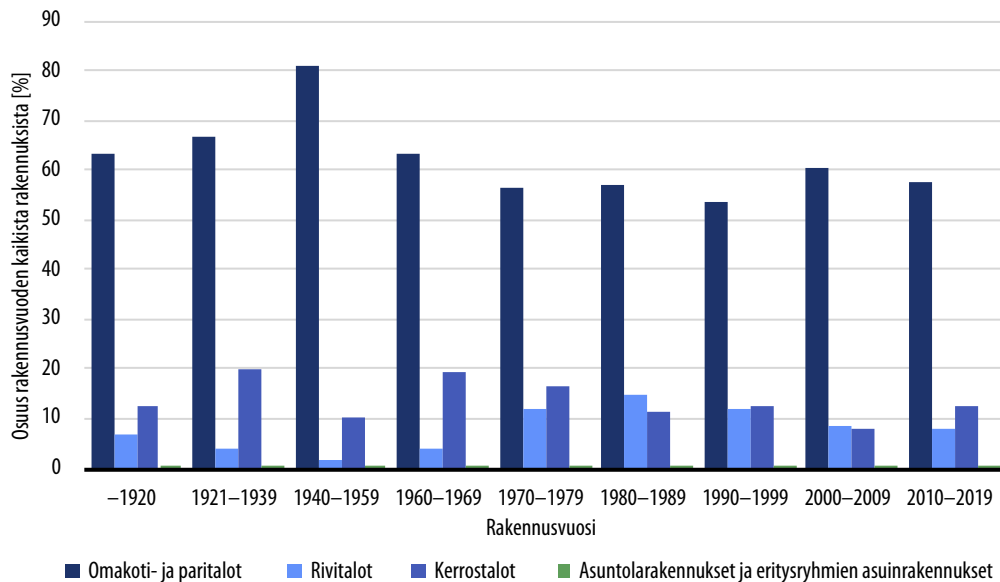


Tulvariskille alttiina ovat erityisesti vuosina 1940–1959 sekä 1980–1989 rakennetut rakennukset. Muina vuosina rakennetut rakennukset jakautuvat tasaisesti kuvaan. Ennen 1940-lukua rakennettuja rakennuksia on kuitenkin selvästi vähiten alttiina tulville.

Rakennustyyppi

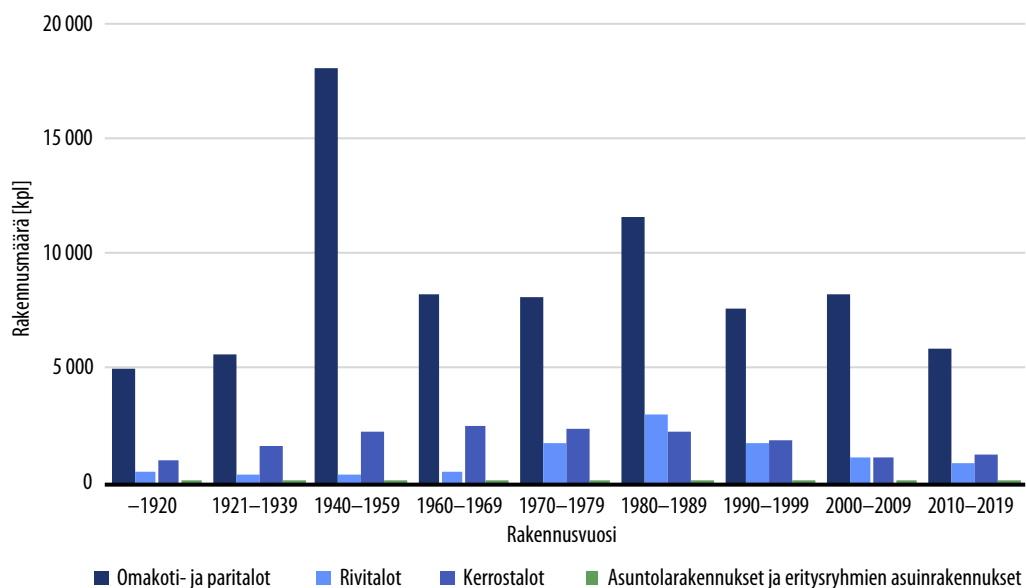
Rakennusvuoden lisäksi voidaan tarkastella alueiden rakennustyyppejä. Tarkastelussa rakennustyyppit on jaettu neljään eri luokkaan: omakoti- ja paritaloihin, rivitaloihin, kerrostaloihin sekä asuntolarakennuksiin ja erityisryhmien asuinrakennuksiin. Rakennustyyppejä tarkasteltiin merkittävillä tulvariskialueilla, joiden tulvariski kasvaa vuoteen 2100 mennessä. Näiden alueiden rakennustyyppijakauma on esitetty kuvassa 3.30.

Kuva 3.30. Merkittävien tulvariskialueiden rakennustyyppijakauma alueilla, joiden tulvariski kasvaa vuoteen 2100 mennessä.



Merkittävimmät tulvalle alttiit rakennustyyppit ovat omakoti- ja paritalot, jotka kattavat noin 63 % kaikista tarkasteltavien tulvariskialueiden rakennuksista. Muita rakennustyyppijä esiintyy huomattavasti vähemmän. Rakennustyyppien lukumäärä eri rakennusvuosina on esitetty kuvassa 3.31.

Kuva 3.31. Merkittävien tulvariskialueiden rakennustyyppien lukumäärä alueilla, joiden tulvariski kasvaa vuoteen 2100 mennessä.



4 Kosteusvaurioiden terveysvaikutukset

Kosteusvauriot ovat hyvin yleisiä rakennuskannassamme (Reijula ym. 2012). Suomalaisista pientaloista 15 prosentissa esiintyy varma kosteusvaurio riskirakenteissa, ja 40 prosentissa riskirakenteet vaativat lisätutkimuksia (Salmela ym. 2022). Tämä luku ei sisällä esimerkiksi kosteissa tiloissa olevia vaurioita. Suomalaisessa syntymäkohorttiaineistossa astmaan sairastumisen kannalta merkityksellisiä vaurioita tai näkyvää homeetta arvioitiin olevan noin 2 prosentissa lasten makuuhuoneissa tai olohuoneessa (Karvonen ym. 2015).

Epidemiologisissa tutkimuksissa kosteusvaurion ja homeen on johdonmukaisesti osoitettu olevan yhteydessä hengitystieoireisiin, astman oireiden pahenemiseen (Institute of Medicine 2004; Mendell ym. 2011; WHO 2009) ja uudemmissa kodin kosteusvaurioita ja homeetta selvittäväissä tutkimuksissa myös uuden astman syntyyn lapsilla (Caillaud ym. 2018; Quansah ym. 2012; Tischer ym. 2011). Tutkimusnäyttö kosteusvaurion tai homeen yhteydestä muihin sairauksiin tai oireisiin, kuten hengitystieinfektioihin, allergiseen nuhaan, yleisoireisiin tai atooppiseen ihottumaan, on heikompaa tai ristiriitaista. Näyttöä ei myöskään ole osoitettu allergiseen alveoliittiin, syöpään eikä reumasairauksiin (Käypähoito 2017). Koska uuden astman riski on siis tärkein kosteusvaurioiden pitkäaikaisvaikutus, keskityttiin tässä katsauksessa selvittämään tätä tarkemmin.

Terveydellisen merkityksen kannalta oleellisinta kosteusvaurioille ja näkyvälle homeelle altistumisessa on kosteusvaurion sijainti rakennuksessa, ilmayhteys oleskelutiloihin sekä ilmanvaihto. Suurin osa seurantatutkimuksista, joissa on tutkittu astmaan sairastumisen riskiä kosteusvaurioaltistumisen jälkeen, on perustanut altistumisen arvioinnin kaksiluokkaiseen (kyllä/ei) altistumismuuttujiin, mikä estää annosvaste-suhteen tarkastelun ja siten raja-arvojen tai riskirajojen asettamisen. Lisäksi tutkimuksissa, joissa on käytetty moniluokkaisia muuttujia, jotka kuvaavat kosteusvauriolle altistumista, on käytetty useimpien erilaisia kosteusvaurion määritelmiä sekä luokitteluja vaurion laajuudesta, mikä hankaloittaa eri tutkimusten välistä vertailtavuutta (Mendell ym. 2018). Koska terveyshaittojen syy tai annosvaste ei ole tiedossa, ei ole mahdollista laatia terveyteen perustuvia ohjeita rakennusten kosteusvaurioaltistumiselle (Mendell & Adams 2019), vaikka tätä ohjeistusta kipeästi tarvittaisiin suomalaisessa asumisterveydessä.

4.1 Kosteusvaurioiden yhteys uuden astman syntyyn

Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen menetelmät on esitetty luvussa 2.2.

Valitut tutkimukset. Etukäteen päätettyjen valintakriteerien perusteella mukaan valittiin 30 kansainvälistä vertaisarvioitua artikkelia 21 eri tutkimuksesta (Liitetaulukko 1). Katsaukseen valituista julkaisuista suurin osa oli lapsille tehtyjä tutkimuksia, sillä aikuisille tehtyjä tutkimuksia oli vain kaksi (Nordbäck ym. 2013, Wang ym. 2019). Kaikki tutkimukset edustivat kodin kosteusvaurioita eikä yksikään julkaisu käsitellyt koulujen, päiväkotien, työpaikkojen tai vanhusten hoivapaikkojen kosteusvaurioita. Vain yhdessä julkaisussa raportoitiin retrospektiivisesti työpaikan kosteusvauriolatistumista prospektiivisen kotialtistumisen lisäksi (Wang ym. 2019). Kyseinen retrospektiivinen julkaisun osa jätettiin katsauksen ulkopuolelle, koska se ei täyttänyt valintakriteerejä.

Tulokset ja pohdinta. Suurimmassa osassa julkaisuja kosteusvaurion sijaintia (huone) ei ollut raportoitu. Seitsemässä tutkimuksessa kosteusvauriohavainnot oli rajattu koskemaan vain oleskelutiloja (olohuone, keittiö, ja/tai makuuhuone) (Dannemiller ym. 2014, Karvonen ym. 2009, 2015, Larsson ym. 2011, Pekkanen ym. 2007, Milanzi ym. 2019) tai oleskelutiloja ja kylpyhuoneita (Shorter ym. 2018, Thacher ym. 2017) koko talon kosteusvaurioaltistumisen arvion sijasta (Behbod ym. 2013, 2015, Cho ym. 2006, Cox ym. 2020, Emenius ym. 2004a, Hedman ym. 2015, Hwang 2011, Iossifova ym. 2009, Jaakkola ym. 2005, McConnell ym. 2002, Nafstad ym. 1998, Nordbäck ym. 2013, Øie ym. 1999, Reponen ym. 2011, 2012, Rönmark ym. 2002, Schroer ym. 2009, Thacher ym. 2017, Tischer ym. 2011, Wang ym. 2019, Wen ym. 2015, Wickman ym. 2013). Astmaan sairastumisen riski oli suurin, jos vaurio tai näkyvä home sijaitti makuuhuoneissa tai oleskelutiloissa (ml. makuuhuoneissa), ja heikoin kylpyhuoneissa tai muissa tiloissa, tai kun eri tiloja ei eritelty, toisin sanoen altistuminen arvioitiin koko talon tasolla, erityisesti omakotitaloissa.

Puolet tutkimuksista oli tehty Pohjoismaissa (Suomi, Ruotsi ja Norja) (Emenius ym. 2004a, 2004b, Jaakkola ym. 2005, Karvonen ym. 2009, 2015, Larsson ym. 2011, Nafstad ym. 1998, Øie ym. 1999, Pekkanen ym. 2007, Rönmark ym. 2002, Thacher ym. 2017), joissa rakennuskannan ja ilmaston voidaan olettaa olevan samankaltainen Suomeen verrattuna. Muut katsaukseen mukaan otetut tutkimukset oli tehty Yhdysvalloissa (Behbod 2013, 2015, Cho ym. 2006, Cox ym. 2020, Dannemiller ym. 2014, Iossifova ym. 2009, McConnell ym. 2002, Reponen ym. 2011, 2012), Taiwanissa (Hwang ym. 2011, Wen ym. 2015) ja Uudessa-Seelannissa (Shorter ym. 2018).

Lasten tutkimusten ja kahden aikuisten tutkimusten esittämät astman riskiestimaatit olivat hyvin samansuuruiset, joten tämänhetkisen tiedon perusteella voidaan olettaa, että lasten tutkimuksista saadut tulokset voidaan yleistää myös aikuisiin.

Tutkimusten tarkastelu. Tutkimustulosten vertailu eri tutkimusten välillä oli ongelmallista, sillä julkaisuissa oli yleensä hyvin vähän tietoa tutkituista rakennuksista (esim. rakennustyyppi (pientalot/kerrostalot), asuinpinta-ala ja ilmastointi) ja niissä käytettiin toisistaan erilaisia kosteusvaurioindikaattoreita (esim. kosteusjälki, tulva, vesivahinko, näkyvä home ja homeen haju).

Katsaukseen valituista julkaisuista etsittiin huomioita ilmayhteyden tutkimisesta sekä vaurion sijainnista, koska erityisesti seinärakenteissa olevat vauriot lisääntyvät todennäköisesti ilmastomuutoksen seurauksena. Tutkimuksissa kosteusvauriohavainnot perustuivat silmämääräisesti kodin sisäpuolelta havaittuihin vaurioihin tai homeen hajun havaitsemiseen, eikä rakenteita avattu. Yhdessäkään tutkimuksessa ei otettu kantaa havaittujen kosteusvaurioiden ilmayhteyteen oleskelutiloihin eikä raportoitu seinärakenteissa sijainneiden kosteusvaurioiden osuutta kaikista kosteusvaurioista. Tutkimuksissa ei myöskään raportoitu mukana olleiden rakennusten ulkoseinärakenteita, jolloin erilaisten seinärakenteiden kosteusvaurioiden aiheuttamista terveusriskien suuruuksista ei ole tietoa. Vaikka suurin osa tutkimuksista oli tehty Euroopassa (Pohjoismaat, Englanti, Saksa ja Alankomaat), voivat ilmasto, talojen ilmanvaihto ja rakennustekniset ominaisuudet poiketa suuresti muissa kuin Pohjoismaissa tehdyissä tutkimuksissa.

4.2 Kosteusvaurioon liittyvien mikrobien yhteys terveyteen

Toisessa systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa selvitimme kosteusvaurioon liittyvien mikrobien yhteyttä terveyshaittoihin. Katsaukseen valittiin kaikki julkaisut, joissa oli tutkittu kosteusvaurion yhteyttä eri mikrobeihin sekä mikrobien yhteyttä terveyteen. Tässä katsauksessa käytämme termiä 'kosteusvaurio' kuvastamaan mitä tahansa tutkimuksissa käytettyä kosteusvaurioindikaattorin yhteyttä tutkittuihin mikrobeihin. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen menetelmät on esitetty luvussa 2.2.

Valitut tutkimukset. Tutkimuksista ensimmäiset oli julkaistu 1990-luvun alussa (Strachan ym. 1990; Wickman ym. 1992) ja suurin osa 2010-luvulla (Liitetaulukko 2). Mikrobien keräämiseen oli käytetty sekä ilma- että pölynäytteitä, joita oli kerätty eri menetelmillä (huonepölyn keräys: imurointi ja imurin pölypussit; laskeutuva pölynkeräys: EDC-liinat (elektrostaattiset liinat), petrimaljat, kartonkilaatikot sekä yläpintojen pyyhintä). Mikrobien tai mikrobimarkkereiden analysoinnissa oli käytetty erilaisia menetelmiä, joista useimmiten oli käytetty viljelyä (16 julkaisussa), kvantitatiivista PCR (DNA-pohjainen polymerase chain reaction)(14 julkaisussa), mikrobien solukalvon markkereita (11 julkaisussa), mikroskopointia (2 julkaisussa) ja DNA-pohjaista sekvensointia (NGS=uuden sukupolven sekvensointi tai pyrosekvensointi) (5 julkaisussa).

Suurin osa tutkimuksista oli tehty kodeista otetuista näytteistä (29 julkaisussa), ja vain pienessä osassa julkaisuja näytteet oli kerätty kouluista (9), toimistoista tai päiväkodeista (2). Vain kuudessa julkaisussa oli pelkästään aikuisia, yhdessä sekä aikuisia että lapsia ja suurimmassa osassa tutkimuksia oli ainoastaan lapsia (32 julkaisua). Suurin osa tutkimuksista oli poikkileikkaustutkimuksia (18 julkaisua). Muut olivat seurantatutkimuksia (11 julkaisua) sekä tapaus-verrokkitutkimuksia (10 julkaisua). Pitkittäistutkimusten seuranta-aika vaihteli vuodesta 13 vuoteen.

Samasta tutkimusjoukosta raportoitiin yleensä vain kerran, mutta joukossa oli myös tutkimuksia, joista oli mukana 2–3 julkaisua. Julkaisuista suurin osa oli tehty Pohjois-Amerikassa (12 Yhdysvallat ja 4 Kanada), Euroopassa (11, joista 10:ssä oli mukana pohjoismaalaisia tutkittavia). Aasiasta oli kahdeksan ja Australiasta tai Uudesta-Seelannista kolme julkaisua.

Mukaan valituissa tutkimuksissa kosteusvaurio tai sen yhdistelmä näkyvän homeen tai homeen hajun kanssa oli määritelty eri julkaisuissa eri tavoin. Tässä katsauksessa käytämme termiä 'kosteusvaurio' kuvastamaan mitä tahansa tutkimuksissa käytettyä kosteusvaurioindikaattorin yhteyttä tutkittuihin mikrobeihin. Kosteusvauriot olivat suurimmaksi osaksi tutkijan tai muun ulkopuolisen havaitsemia (19 julkaisussa) tai sekä havaittuja että itse-raportoituja (8) ja 13 julkaisussa kosteusvaurio oli tutkittavien itse-raportoima.

Tutkimuksessa oli käytetty yhteensä 104 kosteusvaurioindikaattoria, tutkittuna oli 258 mikrobia tai mikrobimarkkeria (+ tuhannet sekvensoinnilla havaitut bakteerit ja sienet), joiden välisiä yhteyksiä oli tutkittu 133 eri terveystapahtumaan. Näistä tutkituista mikrobeista tai niiden markkereista 72 oli yhteydessä positiivisesti kosteusvaurioon, joista 32 oli yhteydessä johonkin tutkittuun terveystapahtumaan. Tässä katsauksessa raportoidaan tilastollisesti merkitsevät yhteydet ja vain niiden mikrobien terveystapahtumat, joissa havaittiin positiivinen yhteys kosteusvaurioon.

4.2.1 Bakteerit

Bakteerien kemialliset markkerit. Kolmessa yhdeksästä julkaisusta (Dales ym. 2005, 2010, Holst ym. 2016, 2020, Jacobs ym. 2014, Johansson ym. 2013, Moniruzzaman ym. 2012, Sharpe ym. 2015, Wan & Li 1999), jossa oli tutkittu kosteusvaurion yhteyttä gram-negatiivisten bakteerien markkeriin, endotoksiiniin, havaittiin vähintään yksi positiivinen yhteys kosteusvaurion ja endotoksiinin välillä. Näistä kolmesta tutkimuksesta yhdessä poikkileikkaustutkimuksessa raportoitiin yhteys aikuisten astman riskiin (Juel Holst ym. 2020), mutta lasten tutkimuksissa endotoksiinilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä ylä- tai alahengitystieoireisiin (Jacobs ym. 2014, Holst ym. 2016) tai keuhkojen toimintaan (keuhkokapasiteetin mittaaminen, spirometria) (Jacobs ym. 2014). Jacobs ym. (2014) tutkimuksessa koulun kosteusvaurio oli yhteydessä korkeampaan endotoksiiniin

pitoisuuteen vain Hollannissa ja sen havaittiin olevan yhteydessä vähentyneeseen hengityksen vinkunaan ja selittävän vähemmän kuin 10 % koulun kosteusvaurion ja kuivan yöllisen yskän välisestä yhteydestä. Yhdessä tutkimuksessa oli tutkittu toista gram-negatiivisten bakteerien markkeria, solukalvon osa lipopolysakkaridi (LPS), joka ei ollut yhteydessä kodin kosteusvaurioon (Hyvärinen ym. 2006). Gram-positiivisten bakteerien solukalvonmarkkeria, muramiinihappoa, oli tutkittu vain yhdessä julkaisussa. Sen pitoisuudet olivat korkeammat, jos kotona oli/oli ollut kosteusvaurio (Tischer ym. 2015). Tässä aikuisten 8 vuoden seurantatutkimuksessa muramiinihappo oli yhteydessä lisääntyneeseen astman oireiluun (mitattuna astmaoireiden pistemäärällä), mutta ei ollut yhteydessä keuhkojen toimintaan (spirometria) (Tischer ym. 2015).

Elinvykyisten bakteerien määrä (viljely). Kosteusvaurion yhteyttä elinvykyisiin bakteereihin oli tutkittu neljässä tutkimuksessa (Hyvärinen ym. 2006, Li ym. 1997, Rosenbaum ym. 2010, Wan & Li 1999), joista ainoastaan astman tapaus-verrokkitutkimuksessa havaittiin kosteusvaurion lisäävän elinvykyisten bakteerien määrää (Hyvärinen ym. 2006). Elinvykyiset bakteerit (Mesofiiliset aktinomykeetit/ bakteerit) eivät olleet tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä kohonneeseen riskiin sairastua astmaan, mutta yhteyden suunta oli riskiä lisäävä (Hyvärinen ym. 2006).

Gram-positiivisten bakteerien määrä (qPCR). Gram-positiivisten bakteerien määrää oli tutkittu neljässä julkaisussa (Adams ym. 2021, Jacobs ym. 2014, Shorter ym. 2018, Tischer ym. 2015), joista kolmessa havaittiin kosteusvaurion yhteys lisääntyneeseen gram-positiivisten bakteerien määrään. HITEA-koulututkimuksessa, jossa oli mukana kolme maata (Espanja, Hollanti ja Suomi), kosteusvaurion ei havaittu olevan tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä gram-positiivisten bakteerien määrään (Jacob ym. 2014). Kun analyysihin oli otettu mukaan ainoastaan Hollanti ja Suomi, ja näyttöiden kausivaihtelu oli otettu huomioon, havaittiin keväällä ja talvella kerättyjen näyttöiden osalta tilastollisesti merkittävä yhteys kosteusvaurion ja gram-positiivisten bakteerien korkeampaan määrään (Adams ym. 2021). Gram-positiivisten bakteerien määrän ei kuitenkaan havaittu olevan yhteydessä hengitystieoireisiin (Adams ym. 2021), astmaan sairastumisen riskiin (Shorter ym. 2018) eikä keuhkokapasiteetin mittaustuloksiin (Tischer ym. 2015).

Gram-negatiivisten bakteerien määrä (qPCR). Gram-negatiivisten bakteerien määrää oli tutkittu kolmessa julkaisussa (Adams ym. 2021, Jacobs ym. 2014, Tischer ym. 2015), joista kaikissa havaittiin kosteusvaurion yhteys lisääntyneeseen gram-negatiivisten bakteerin määrään, mutta HITEA-koulututkimuksessa ainoastaan Hollannin näytteissä, kun kausivaihtelua ei otettu huomioon (Jacobs ym. 2014). Gram-negatiivisten bakteerien määrä ei kuitenkaan ollut yhteydessä hengitystieoireiden määrään (Adams ym. 2021), astmaoireiden vakavuuteen tai keuhkokapasiteetin mittaustuloksiin (Tischer ym. 2015). Sen sijaan korkea gram-negatiivisten bakteerien määrä oli yhteydessä vähentyneeseen hengityksen vinkunaan HITEA-koulututkimuksessa (Jacobs ym. 2014).

Bakteerien diversiteetti. Neljässä julkaisussa oli laskettu sekvensointimenetelmällä bakteerien lajirikkaus sekä monimuotoisuus (alpha-diversiteetti, mikrobien moninaisuus näytteessä) (Adams ym. 2021, Cox ym. 2022, Fu ym. 2020, 2021). Ainoastaan HITEA-koulututkimuksessa havaittiin tilastollisesti merkitsevä yhteys kosteusvaurion ja suuremman bakteerien lajirikkauden välillä erityisesti talvella otetuissa näytteissä, sekä kosteusvaurion ja bakteerien monimuotoisuuden välillä suomalaisissa kouluissa keväällä ja talvella otetuissa näytteissä (Adams ym. 2021). Bakteereiden suurempi lajirikkaus ja monimuotoisuus oli tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä hengitystieoireiden suurempaan määrään ainoastaan suomalaisilla oppilailta.

Kolmessa julkaisussa oli tutkittu mikrobien kokonaiskoostumusta (kompositio) eli beta-diversiteettiä näytteessä (näytteiden välinen mikrobikoostumuksen samanlaisuus/erilaisuus) (Cox ym. 2022, Fu ym. 2020, 2021), mutta se ei ollut yhteydessä kosteusvaurioon.

Bakteerilajit ja -suvut (qPCR ja viljely). qPCR-menetelmällä oli mitattu kahta eri bakteerisukua seitsemässä tutkimuksessa: *Streptomyces*-sukua kuudessa (Juel Holst ym. 2020, Jacobs ym. 2014, Johansson ym. 2013, Nordbäck ym. 2016, 2017, Simoni ym. 2011) ja *Mycobacterium*-sukua kahdessa (Jacobs ym. 2014, Tischer ym. 2015) julkaisussa. Näistä mikään ei ollut tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä kosteusvaurioon. Viljelyä ei ollut käytetty bakteerisukujen määrittämiseen. Viljelymenetelmällä ei ollut käytetty yhdessäkään julkaisussa bakteerisukujen tai -lajien määrittämiseen.

Bakteerilajit ja -suvut (sekvensointi). Sekvensoinnissa voidaan analysoida kaikkia bakteerien taksonomian tasoja, eikä tiettyjä ennalta määrättyjä bakteereja, kuten qPCR-menetelmällä. Neljässä julkaisussa oli käytetty sekvensointimenetelmää bakteerien määrittämiseen (Adams ym. 2021, Cox ym. 2022, Fu ym. 2020, 2021). Kolmessa tutkimuksessa oli havaittu kosteusvaurion olevan yhteydessä seuraaviin yksittäisiin sukuihin tai lajeihin: *Sphingomonas* (Adams ym. 2021), *Izhakiella*, *Microcoleus* ja *Rhodomicrobium* suvut (Fu ym. 2021), *Alkanindiges illinoisensis*, *Dialister invisus*, ja *Coprococcus eutactus*, (Cox ym. 2022), vaikka *Sphingomonas*-suvun ja kahden ASVn suhteelliset osuudet olivat tilastollisesti merkitsevästi korkeammat ainoastaan suomalaisissa kosteusvauriokouluissa verrattuna verrokkikouluihin. Vastaavaa yhteyttä ei havaittu hollantilaisissa kouluissa. Toinen ASV *Sphingomonas*-suvusta (ASV9) sekä *Sphingomonas*-suku lisäsivät hengitysoireiden määrää selittäen 6 % tai 33 % kosteusvaurion ja hengitystieoireiden määrän välisestä yhteydestä (Adams ym. 2021). *Alkanindiges illinoisensis*, *Dialister invisus*, ja *Coprococcus eutactus* -lajien suhteelliset osuudet olivat korkeammat, jos kodissa oli näkyvää hometta tai kosteusvaurio, mutta ne eivät lisänneet tilastollisesti merkitsevästi astmaa, hengityksen vinkunaa, inhalaatioatopiaa tai nuhaa 7 tai 12 vuoden iässä, vaan yhteys oli osin jopa suojaava (Cox ym. 2021).

4.2.2 Sienet

Sienien kemialliset markkerit. Seitsemässä julkaisussa oli tutkittu β -glukaania (beta-1,3-glucan) (Dales ym. 2010, Holst ym. 2016, 2020, Jacobs ym. 2014, Maheswaran ym. 2014, Tischer ym. 2015, Wan & Li 1999), yhdessä beta-1,3 1,6-glukaania (Choi ym. 2013), viidessä ergosterolia (Choi ym. 2013, Dales ym. 2010, Dharmage ym. 2002, Hyvärinen ym. 2006, Jacobs ym. 2014), yhdessä EPS (*Penicillium/Aspergillus* -sukujen markkeri) (Douwes ym. 1999) tai citinasen aktiivisuutta (Holst ym. 2016). Neljässä kymmenestä julkaisusta, jossa oli tutkittu kosteusvaurion yhteyttä näihin sienien biomassaan tai solukalvon markkereihin, havaittiin positiivinen yhteys kosteusvaurion ja markkerin pitoisuuden välillä. Euroopalaisessa koulututkimuksessa havaittiin kosteusvaurion olevan yhteydessä ergosteroliin Espanjassa ja β -glukaanin Hollannissa, mutta samaa yhteyttä ei havaittu Suomessa (Jacobs ym. 2014). Korkeat ergosterolin ja β -glukaanin pitoisuudet olivat yhteydessä hengityksen vinkunan pienentyneeseen riskiin, ja samansuuntaisesti, mutta ei-tilastollisesti merkitsevästi tukkoisuuteen (Jacobs ym. 2014). Yhteyttä ei havaittu kuivaan yölliseen yskään tai nenäoireisiin (Jacobs ym. 2014). Lisäksi korkeampi β -glukaanin pitoisuus oli yhteydessä spiometriatuloksiin parantaen FVC-tuloksia (keuhkojen koko kapasiteetti) tilastollisesti merkitsevästi ja samansuuntaisesti, mutta ei-tilastollisesti merkitsevästi myös FEV1-tuloksia (ensimmäisen sekunnin ulospuhallustulosta) (Jacobs ym. 2014). Taiwanilaisessa tutkimuksessa, jossa näytteet oli kerätty päiväkodeista ja toimistoista, β -glukaanin havaittiin olevan yhteydessä lisääntyneeseen uupumukseen, mutta ei muihin 9 tutkittuun hengitystie- tai yleisöireeseen (Wan & Li 1999). Ainoassa pitkittäistutkimuksessa, jossa kosteusvaurio oli yhteydessä ergosterolin pitoisuuden olohuoneesta kerätystä näytteestä, korkean ergosterolipitoisuuden havaittiin olevan yhteydessä akuutteihin hengitystiesairaus-episodeihin alle 2-vuotiailla lapsilla, mutta tulos ei ollut tilastollisesti merkitsevä (Dales ym. 2010). Vastaavaa yhteyttä ei havaittu lapsen makuuhuoneesta kerätyistä näytteistä. Hengitystieoireiden tapaus-verrokkitutkimuksessa olohuoneesta kerätty EPS oli positiivisesti yhteydessä itse raportoituun kosteusvaurioon, mutta ei tutkijan havaitsemaan kosteusvaurioon tai makuuhuoneesta (lattia ja patja) kerättyyn EPS:ään (Douwes ym. 1999). Olohuoneesta määritetty EPS näytti olevan yhteydessä astman lisääntyneeseen riskiin, vaikkakin ei-tilastollisesti merkitsevästi, mutta se ei ollut yhteydessä hengitystieoireisiin tai bronkiittiin. Citinasen aktiivisuutta tutkinut julkaisu ei löytänyt yhteyttä kosteusvaurion ja markkerin välillä (Holst ym. 2016).

Elinkykyisten sienien määrä (viljely). Elinkykyisten sienien määrää oli tutkittu 16 julkaisussa (Behbod ym. 2015, Choi ym. 2013, Dharmage ym. 2002, Garrett ym. 1998, Holst ym. 2016, Hyvärinen ym. 2006, Jones ym. 2011, Li ym. 1997, Li & Hsu 1997, Oluwole ym. 2017, Rosenbaum ym. 2010, Simoni ym. 2011, Stark ym. 2003, Strachan ym. 1990, Wan & Li 1999, Wickman ym. 1992). Tilastollisesti merkitsevä positiivinen yhteys havaittiin kosteusvaurion ja elinkykyisten sienien välillä viidessä julkaisussa (Garret ym. 1998, Holst ym. 2016, Jones ym. 2011, Simoni ym. 2011, Wan & Li 1999), joista neljä oli poikkileikkaustutkimuksia ja yksi astman tapaus-verrokkitutkimus. Näistä tutkimuksista ainoastaan yhdessä sienet

olivat yhteydessä tilastollisesti merkitsevästi kuivaan yöskään, yskään ja nuhaan, mutta ei hengityksen vinkunaan tai spirometriatuloksiin (FEV1 tai FVC) (Simoni ym. 2011). Elinkykyisiä hiivoja oli tutkittu 12 tutkimuksessa (Behbod ym. 2015, Choi ym. 2013, Dharmage ym. 2002, Garrett ym. 1998, Holst ym. 2016, Jones ym. 2011, Li ym. 1997, Li & Hsu 1997, Rosenbaum ym. 2010, Stark ym. 2003, Strachan ym. 1990), joista kosteuden kondensoitumisen kodissa havaittiin lisäävän hiivojen määrää tilastollisesti merkitsevästi yhdessä tapaus-verrokkitutkimuksessa (Choi ym. 2013), kun taas kahdessa tutkimuksessa havaittiin pienemmät hiivojen pitoisuudet, jos kodissa oli tunkkainen haju (Li ym. 1997, Holst ym. 2016) tai sen rakenteisiin oli päässyt tulvavettä (Holst ym. 2016). Tapaus-verrokkitutkimuksessa hiivojen ei havaittu olevan yhteydessä astmaan, nuhaan tai ihottumaan (Choi ym. 2013).

Sienten määrä (qPCR). Sienten DNA-määrän yhteyttä kosteusvaurioon oli tutkittu kuudessa julkaisussa (Adams ym. 2021, Juel Holst ym. 2020, Norbäck ym. 2016, 2017, Shorter ym. 2018, Simoni ym. 2011), joista neljässä havaittiin positiivinen yhteys kosteusvaurioon. Näistä yhdessä koulututkimuksessa havaittiin yhteys kosteusvaurion ja qPCR:lla määritetyn sienten määrän välillä ainoastaan suomalaisissa, mutta ei hollantilaisissa, kouluissa (Adams ym. 2021). Kolme neljästä tutkimuksesta oli kouluissa tehtyjä poikkileikkaustutkimuksia, joissa havaittiin sienten DNA-määrän positiivinen yhteys hengitystieoireiden määrään (vain Suomessa, mutta ei Hollannissa) (Adams ym. 2021), silmä-, nenä- ja nieluoireisiin (Norbäck ym. 2016) ja ei-tilastollinen yhteys hengityksen vinkunaan, yskään ja nuhaan (Simoni ym. 2011), mutta ei iho-oireisiin, päänsärkyyn tai väsyneisyyteen (Norbäck ym. 2016) tai yöskään tai spirometriatuloksiin (Simoni ym. 2011). Astman tapaus-verrokkitutkimuksessa ei havaittu yhteyttä sienten DNA-määrän ja uuden astman puhkeamisen välillä (Shorter ym. 2018).

Jaottelu sienten tarvitseman kosteuden mukaan (vesiaktiivisuus). Kun sieniä jaettiin niiden kasvussa tarvittavan kosteuden mukaan hydrofiilisiin (vesiaktiivisuus, $a_w \geq 0,90$), mesofiilisiin (0,80-0,90) ja kserofiilisiin sieniin (<0,80), olivat sekvensointiin perustuvat mesofiiliset ja hydrofiiliset sienet yhteydessä kosteusvaurioon tai näkyvään homeeseen (Cox ym. 2022). Kserofiiliset sienet eivät olleet yhteydessä kosteusvaurioon sekvensointiin tai viljelyyn perustuvissa tutkimuksissa (Cox ym. 2022, Hyvärinen ym. 2006). Mikään kosteuden mukaan jaoteltu sieniryhmä ei ollut yhteydessä astmaan, hengityksen vinkunaan, inhalaatioatopiaan, nuhaan tai uuden astman syntymään.

Sienten diversiteetti. Viidessä julkaisussa oli määritetty sekvensointimenetelmällä sienten lajirikkaus sekä monimuotoisuus (alpha-diversiteetti, sienten moninaisuus näytteessä) (Adams ym. 2021, Cox ym. 2022, Dannemiller ym. 2014, Fu ym. 2020, 2021). Yhdessä aikuisten poikkileikkaustutkimuksessa sienten lajirikkaus oli laskettu käyttämällä 18 eri sienen ja yhden bakteerin qPCR-tulosta (Juel Holst ym. 2020). HITEA-koulututkimuksessa havaittiin tilastollisesti merkitsevä yhteys kosteusvaurion ja suuremman sienirikkauden ja monimuotoisuuden välillä keväällä otetuissa näytteissä (Adams ym. 2021) sekä

tapausverrokkitutkimuksessa keittiön vesivuotojen tai mitatun seinäkosteuden ja sienirik-
kauden välillä (Dannemiller ym. 2014). Sienten keskimääräinen lajirikkaus, mutta ei korkea
lajirikkaus, oli tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä hengitystieoireiden määrään ainoas-
taan hollantilaisilla oppilailla ja keskimääräinen monimuotoisuus puolestaan vähensi hen-
gitystieoireita ainoastaan suomalaisilla oppilailla (Adams ym. 2021). Yhteyden muoto ei
siis ollut annosvasteinen. Sienten lajirikkaus vähensi astmaan sairastumisen riskiä tapaus-
verrokkitutkimuksessa (Dannemiller ym. 2014), mutta ei vaikuttanut astman riskiin 7 tai
12 vuoden iässä (Cox ym. 2021).

Kolmessa tutkimuksessa oli analysoitu sienten kokonaiskoostumuksen (kompositio)
eroavaisuutta/samanlaisuutta näytteiden välillä eli beta-diversiteettiä (Cox ym. 2022,
Dannemiller ym. 2014, Fu ym. 2020, 2021), mutta se ei ollut yhteydessä kosteusvaurioon.

Sienten lajit ja -suvut (qPCR ja viljely). Kahdeksassa julkaisussa oli määritetty 1–18
sienten sukuja qPCR-menetelmällä (Adams ym. 2021, Juel Holst ym. 2020, Jacobs ym.
2014, Nordbäck ym. 2016, 2017, Shorter ym. 2018, Simoni ym. 2011, Tischer ym. 2015) ja
9 julkaisussa oli raportoitu viljelemällä 2–16 eri elinkyistä sienisukuja (Behbod ym. 2015,
Choi ym. 2013, Garrett ym. 1998, Gent ym. 2002, Holst ym. 2016, Li ym. 1997,
Li & Hsu 1997, Rosenbaum ym. 2010, Stark ym. 2003). Seitsemässä julkaisussa qPCR:llä
oli määritetty joko *Penicillium/Aspergillus* tai *Penicillium/Aspergillus/Paecilomyces*
variotii spp.-ryhmiä, viidessä *Aspergillus versicolor*-lajia ja neljässä *Cladosporium*-
sukua tai sen lajeja, kun taas viljelymenetelmällä lähes kaikissa julkaisuissa oli tutkittu
Aspergillus, *Penicillium* ja *Cladosporium* -sukuja (8). *Alternaria*-sukua oli tutkittu viidessä,
Aureobasidium-sukua kolmessa, *Trichoderma*-sukua kahdessa ja muita lajeja yksittäisissä
julkaisuissa (mm. *Cladosporium herbarum*, *Eurotium amstelodami*, *Stachybotrys*
chartarum, *Wallemia sebi*, *Penicillium chrysogenum*). Neljässä qPCR -menetelmään
perustuvassa julkaisussa *Penicillium/Aspergillus/Paecilomyces variotii spp.*-ryhmä
olivat yhteydessä kosteusvaurioon (Adams ym. 2021, Jacobs ym. 2014, Shorter ym. 2018,
Tischer ym. 2015), *Cladosporium*-suku yhdessä (Shorter ym. 2018), viljelymenetelmään
perustuvista suvuista *Cladosporium*-suku kolmessa (Garrett ym. 1998, Gent ym. 2002,
Li & Hsu 1997) ja *Penicillium*-suku kahdessa julkaisussa (Li & Hsu 1997, Rosenbaum ym.
2010). qPCR-menetelmällä mitatut kosteusvaurioon yhteydessä olleet sienisuvut eivät
olleet yhteydessä terveyshaittoihin. Viljelyssä havaittu *Cladosporium*-suku oli tilastollisesti
merkitsevästi yhteydessä hengityksen vinkunaan, yskään ja allergiseen herkistymiseen
sienille (*Cladosporium cladosporioides*, *Penicillium mix* ja *Aspergillus mix*) (Garret ym.
1998), astmaan (Li & Hsu 1997), mutta ei muihin hengitystieoireisiin (Garret ym. 1998),
pysyvään yskään (yhteys vain keskimäinen luokka vs. alin luokka, mutta ei korkea vs.
alin luokka), hengityksen vinkunaan (Gent ym. 2002) tai atopiaan (Li & Hsu 1997). Pienessä
AUDIT-kohortissa varhaislapsuuden kodin korkea *Penicillium* määrä oli yhteydessä
lisääntyneeseen hengityksen vinkunaan (Rosenbaum ym. 2010), kun taas taiwanilaisessa

pienessä kouluikäisten lasten tapaus-verrokkitutkimuksessa se suojaasi allergiselta nuhalta, mutta ei ollut yhteydessä astmaan (Li & Hsu 1997).

Sienten lajit ja -suvut (sekvensointi). Viidessä julkaisussa (Adams ym. 2021, Cox ym. 2022, Dannemiller ym. 2014, Fu ym. 2020, 2021) oli käytetty sekvensointia sienten määrittämiseen, jolloin voidaan analysoida kaikkia sienten taksonomian tasoja, eikä tiettyjä ennalta määrättyjä sienisukuja, kuten qPCR-menetelmällä tai viljelyssä elatusmaljasta riippuen. Kolmessa julkaisussa oli havaittu kosteusvaurion lisäävän yksittäisiä homelajeja, -sukuja tai ASV:tä (ASV=amplicon sequence variant, sekvensoinnissa käytetty laji vastaava yksikkö): *Aspergillus*-suku ja *Aspergillus proliferans* (ASV4)-laji (Adams ym. 2021), *Phaeosphaeria podocarp*i, *Toxicocladosporium irritans*, *Plectosphaerella oratosquillae* (Cox ym. 2022), *Coniosporium apollinis* -lajit ja *Ustilaginomyces*-luokka (Dannemiller ym. 2014). Hiivoista *Vishniacozyma victoriae* (ASV5) (oli vain Suomessa yhteydessä) (Adams ym. 2021), *Candida parapsilosis*, *Rhodotorula mucilaginosa* (Cox ym. 2022), *Cryptococcus uzbekistanensis*, *Cryptococcus albidus* -lajit ja *Rhodospordium*-suku (Dannemiller ym. 2014) olivat positiivisesti yhteydessä kosteusindikaattoriin.

Aspergillus-suvun ja *Aspergillus proliferans* (ASV4)-lajin suurempi suhteellinen osuus oli yhteydessä vähentyneeseen hengitystieoireiden määrään, mutta kummassakaan ei ollut havaittavissa annos-vastesuhdetta (Adams ym. 2021). *Phaeosphaeria podocarp*i-laji oli yhteydessä pienentyneeseen astman riskiin 12 vuoden iässä, mutta muihin päätapahtumiin (hengityksen vinkuna, inhalaatioatopia, nuha) se ei ollut yhteydessä (Cox ym. 2022). *Toxicocladosporium irritans*-laji oli yhteydessä pienentyneeseen astman, hengityksen vinkumisen ja inhalaatioatopian riskiin 7 ja 12 vuoden iässä, mutta se lisäsi nuhan riskiä 12 vuoden iässä (Cox ym. 2022). *Plectosphaerella oratosquilla*-laji ei ollut yhteydessä yhteenkään tutkittuun neljään terveystapahtumaan poikkileikkaustilanteessa tai 5 vuoden seurannassa eikä *Coniosporium apollinis*-laji tai *Ustilaginomyces*-luokka ollut yhteydessä astmaan sairastumisen riskiin (Dannemiller ym. 2014). Lisäksi HITEA-koulututkimuksessa havaittiin hollantilaisissa kouluissa 41 eri ASV:tä, jotka olivat yhteydessä koulujen kosteusvaurioihin, mutta mikään ei ollut tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä hengitystieoireiden määrään (Adams ym. 2021). Hiivoista *Candida parapsilosis* (Cox ym. 2022), *Cryptococcus uzbekistanensis*, *Cryptococcus albidus* -lajit ja *Rhodospordium*-suku (Dannemiller ym. 2014) eivät olleet yhteydessä astmaan tai *Vishniacozyma victoriae*-laji hengitystieoireiden määrään (Adams ym. 2021), mutta *Rhodotorula mucilaginosa*-laji oli yhteydessä pienentyneeseen astman riskiin poikkileikkausaineistossa, mutta ei 5 vuoden seurannassa (Cox ym. 2022).

ERMI (Environmental Relative Moldiness Index). ERMI-indeksi koostuu 36 qPCR-menetelmällä määritetystä sienestä, joista ensimmäisen ryhmän 26 sientä liittyvät tyypillisesti kosteusvauriorakennukseen ja toisen ryhmän 10 sientä ovat ei-kosteusvaurioon liittyviä seiniä. Ryhmien sienien määrät lasketaan yhteen ja ryhmien summat vähennetään

toisistaan, jolloin saadaan ERMI (vaihtelu -10 ja +30 välillä). Kolmessa julkaisussa oli selvitetty kosteusvaurion yhteyttä ERMI-indeksiin, josta yksi oli aikuisten poikkileikkaustutkimus (Effert ym. 2016) ja kaksi lasten kohorttia vuoden (Rosenbaum ym. 2015) ja kuuden vuoden seuranta-ajalla (Reponen ym. 2011). Kaikissa jokin tutkituista kosteusvaurioindikaattoreista oli yhteydessä korkeampaan ERMI-indeksiin. ERMI oli yhteydessä astmaan sairastumisen riskiin lapsilla (Reponen ym. 2011), mutta ei aikuisilla (Effert ym. 2016) tai lapsilla hengityksen vinkunaan (Rosenbaum ym.2015).

4.2.3 Kosteusvaurioon liittyvien mikrobitutkimusten ja niiden terveyshaittojen tarkastelua

Tutkimuksessa oli käytetty yhteensä 104 kosteusvaurioindikaattoria, tutkittuna oli 258 mikrobia tai mikrobimarkkeria (+ tuhannet sekvensoinnilla havaitut bakteerit ja sienet), joiden välisiä yhteyksiä oli tutkittu 133 eri terveyspäätetapahtumaan. Näistä tutkituista mikrobeista tai niiden markkereista 72 oli yhteydessä positiivisesti kosteusvaurioon, joista 32 oli yhteydessä johonkin tutkittuun terveyspäätetapahtumaan. Kun tutkimukset jaoteltiin viljelymenetelmillä (17 julkaisua), qPCR:llä (10 julkaisua) ja sekvensoinnilla (5 julkaisua) määritelyihin mikrobialtistumisiin, qPCR:llä mitatuista mikrobeista tai bakteeri- tai sienimääristä 23 % oli yhteydessä kosteusvaurioon, 13 % viljelyllä ja <1 % sekvensoinnilla määritellyistä mikrobeista. Elinkykyisistä bakteereista tai sienistä (viljely) 7 % oli yhteydessä terveyspäätetapahtumaan (lisäsi riskiä tai suojaasi), qPCR:llä mitatuista 5 % ja sekvensoimalla <0,2 %.

Tulvat. Aiemmin yllä esitetyistä tuloksista poimitaan vielä yhteen tutkimukset, joissa oli yhtenä kosteusvaurion indikaattorina käytetty rakennukseen kohdistunutta tulvaa (Li ym. 1997, Li & Hsu 1997, Wan & Li 1999), jotka mahdollisesti lisääntyvät ilmastonmuutoksen seurauksena. Taiwanilaisissa tutkimuksissa tulvan havaittiin vähentävän elinkykyisten hiivojen määrää (Li ym. 1997), lisäävän elinkykyisiä sieniä (Wan & Li 1999) ja elinkykyistä *Penicilliumia* kesällä kerätyistä näytteestä (Li & Hsu 1997). Korkeampi *Penicillium*-suvun määrä oli yhteydessä alempaan riskiin sairastua allergiseen nuhaan, mutta ei astmaan (Li & Hsu 1997). Elinkykyisten sienten määrällä ei ollut yhteyttä 10 tutkittuun oireeseen (Wan & Li 1999). Yhdysvaltalaisessa poikkileikkaustutkimuksessa koko tutkimusalue oli keskitetty tulva- tai sen reuna-alueille, josta tulvalle altistuneita rakennuksia oli 12 % (Effert ym. 2016). qPCR-määrityksellä tehty ERMI ei ollut yhteydessä tulvaan eikä astmaan (Effert ym. 2016).

Uusi astma. Koska uuden astman riski on siis tärkein kosteusvaurioiden pitkäaikaisvaikutus, vedetään vielä yhteen tulokset näistä julkaisuista. Kolmessa yhdysvaltalaisessa syntymäkohortissa oli tutkittu astmaan sairastumisen riskiä keräämällä pölynäyte tai pöly- ja ilmanäyte varhaislapsuudessa ja seuraamalla lapsia 7–13 vuoden ikään asti (Behbod ym.

2015, Dannemiller ym. 2014, Reponen ym. 2011). Viljelyllä määritetyt elinkykyiset sienet eivät olleet yhteydessä eri aikana raportoituun kosteusvaurioon (Behbod ym. 2015), mutta qPCR-menetelmällä mitattu ERMI-indeksi oli korkeampi, jos kodissa oli havaittu homeen hajua, mutta ei näkyvää hometta. ERMI oli yhteydessä suurempaan riskiin sairastua astmaan (Reponen ym. 2011). Pyrosekvensoinnilla ja qPCR-menetelmillä määritetyistä sienistä kuusi oli yhteydessä johonkin useista kosteusvaurioindikaattoreista, mutta vain yksi (sienten lajirikkaus) lisäsi astmaan sairastumisen riskiä, jos lajirikkaus varhaislapsuuden kodissa oli matala (Dannemiller ym. 2014). Kahdessa uuden astman tapaus-verrokkitutkimuksessa kosteusvaurioon yhteydessä olleet mikrobit eivät lisänneet uuden astman riskiä (Hyvärinen ym. 2006, Shorter ym. 2018). Kahdessa yhdysvaltalaisessa syntymäkohortissa havaittiin yhteensä 19 elinkykyistä sientä (Gent ym. 2002, Rosenbaum ym. 2010 ja qPCR:llä mitattu ERMI-indeksi (Rosenbaum ym. 2015), joista kolme oli yhteydessä kosteusvaurioon. Näistä vain korkea *Penicillium*-määrä oli yhteydessä varhaislapsuuden hengityksen vinkunan lisääntyneeseen riskiin (Rosenbaum ym. 2010).

Pohdintaa. Aiemman epidemiologisen tutkimustiedon pohjalta mikään kosteusvaurioihin liittyvä yksittäinen mikrobimarkkeri, -määrä tai -laji ei ollut yhdenmukaisesti yhteydessä kosteusvaurioihin. Tämä voi osittain johtua siitä, että julkaisuissa oli käytetty erilaisia menetelmiä mikrobien keräykseen ja määrittäykseen, minkä vuoksi tulosten vertailu tutkimusten välillä on haastavaa. Lisäksi kosteusvaurion määrittäminen ei aina tapahtunut samaan aikaan kun mikrobinäyte kerättiin, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia kosteusvaurioon liittyvien mikrobien tunnistamisessa. Samoin kosteusvauriot havaittiin silmämääräisesti tai pohjautuivat vain osittain homeen tai tunkkaiseen hajun havaitsemiseen, jolloin ei saada täyttä varmuutta rakenteiden piilossa olevista kosteusvaurioista, koska rakenteita ei avattu. Osa tutkimuksissa analysoiduista mikrobeista saattoi siten olla yhteydessä todelliseen kosteusvaurioon, mutta jäi käytettyjen tutkimusmenetelmien takia havaitsematta.

Tutkituista mikrobeista tai niiden markkereista pieni osa oli yhteydessä kosteusvaurioihin ja näistä mikrobeista tai niiden markkereista vain harva oli yhteydessä terveyshaittoihin. Tutkimuksissa oli tavallista, että näytteistä analysoitiin monta mikrobia tai mikrobimarkkeria, joita analysoitiin useita kosteusvaurioindikaattoria ja terveystapahtumia vasten. Hyvin harva tutkimus otti huomioon monitestauksesta johtuvan virheellisten löydösten mahdollisuuden.

5 Rakennusten lämpöolot, energiankulutus ja jäähdytyksen käyttö Suomessa

5.1 Simulointitapaukset

Lämpöolojen ja energiankulutuksen simulointitutkimuksessa käytettiin kolmea eri rakennustyyppiä: vanhainkoti, asuinkerrostalo ja pientalo. Kustakin rakennustyyppistä simuloitiin sekä olemassa olevaa rakennuskantaa sekä uudiskohdetta kuvaava esimerkkirakennus. Simuloidut rakennukset sijaitsevat Vantaan lähiöalueella, jossa kunkin rakennuksen ympärillä oletettiin olevan samanlaisia rakennuksia tyypillisten varjostusolosuhteiden huomioon ottamiseksi. Kunkin rakennuksen suuntaus valittiin siten, että ikkuna-alaltaan suurin julkisivu suuntautuu etelään.

Olemassa olevaa rakennuskantaa kuvaavien esimerkkirakennusten osalta oletettiin, ettei niihin ole tehty energiakorjauksia ja rakennusten ominaisuudet sekä talotekniset järjestelmät ja niiden ominaisuudet vastaavat kunkin kohteen suunnitteluajan käytäntöjä tai rakentamismääräysten vaatimuksia. Uudiskohteet täyttävät nykyiset rakentamismääräykset ja uudisvanhainkoti sekä uudiskerrostalo täyttävät niitä koskevan kesäaikaisen huonelämpötilan 150 astetunnin vaatimuksen 25 °C ja 27 °C ylittävien huonelämpötilojen osalta (Ympäristöministeriö, 2017). Sekä vanhojen rakennusten että uusien esimerkkirakennuksen ilmanvaihdon ilmamäärät mitoitettiin huonekohtaisesti ja uudisrakennusten ilmamäärät täyttävät FINVAC ry:n julkaisemat ilmanvaihdon suositukset (FINVAC 2019, FINVAC 2020). Esimerkkirakennukset simuloitiin käyttäen tässä tutkimusosiossa huonekohtaisesti määriteltyjä tunnittaisia valaistuksen ja huonelaitteiden käyttöprofiileja, jotka kuvaavat kunkin rakennustyyppin normaalia käyttöä. Vuotuiset rakennusten sisävalaistuksen ja huonelaitteiden lämpökuormat vastaavat nykyisten rakentamismääräysten ohjearvoja (Ympäristöministeriö, 2017).

Aktiivisella jäähdytyksellä varustettujen esimerkkirakennusten huonelaitteiden jäähdytystehon mitoitus valittiin suhteellisen korkeaksi (45 W/m²), koska jäähdytystehon haluttiin varmasti riittävän huonelämpötilojen hallintaan myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Koska simulointitapauksilla tutkittiin ilmastonmuutoksen vaikutusta jäähdytystarpeeseen, tulee lämpöolojen olla vertailukelpoisia kaikissa aktiivisella jäähdytyksellä varustetuissa tapauksissa riippumatta ilmasto-oloista.

5.1.1 Vanhainkodit

Olemassa olevaa rakennuskantaa kuvaavaa 80-luvun vanhainkotiä ja uudisvanhainkotiä kuvataan pohjaratkaisultaan ja muodoltaan samanlaisella 5-kerroksisella rakennuksella, jonka lämmitetty nettoala on 4068 m² (kuva 5.1). Molemmissa rakennuksissa vanhuksat asuvat yhdelle hengelle tarkoitetuissa noin 25 m²:n asunnoissa ja lisäksi rakennuksissa on yhteiskäyttöön tarkoitettuja tiloja. Molemmat rakennukset ovat betonirakenteisia, mutta niiden vaipan ominaisuudet kuten lämmöneristystaso, ilmanpitävyys, ikkuna-alat ja taloteknisten järjestelmien ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Molemmat rakennukset lämpiävät kaukolämmöllä ja lämmönjako on toteutettu vesiradiaattoreilla. Tilojen lämmityksen asetusarvo on 23 °C eikä huonelämpötiloja päästetä laskemaan sen alapuolelle myöskään kesällä.

Kuva 5.1. Vanhainkodin IDA ICE simulointimalli.



80-luvun vanhainkoti

80-luvun vanhainkoti on varustettu perustapauksessa kirkkailla 3-lasisilla ikkunoilla, joiden U-arvo on 2,1 W/m²,K ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,68. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 27 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,29 W/m², K ja vaipan ilmavuotoluku q₅₀ on 6 m³/h,m². Rakennus on varustettu vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä ja yhden hengen asuntojen tulo- ja poistoilmavirrat ovat 18 dm³/s,asunto (0,76 dm³/s,m²). Poiketen muista rakennustyypeistä, 80-luvun vanhainkodin tilojen mitoitusilmamäärien oletetaan olevan yhtä suuria kuin uudisvanhainkodin mitoitusilmamäärät. Perustapauksessa rakennuksessa ei ole aktiivista ilmanvaihdon tai tilojen jäähdytystä ja ilmanvaihdon tuloilman sisäänpuhalluslämpötila on 19 °C tai korkeampi ulkoilman lämpötilasta riippuen.

Taulukossa 5.1 kuvataan 80-luvun vanhainkodin simulointitapaukset. Perustapauksessa ei käytetä mitään passiivisia auringonsuojaratkaisuja kuten kaihtimia. Tapauksissa, joissa kaihtimet on käytössä, ne on asennettu uloimpaan lasiväliin ja kaihtimet on käytössä, kun

auringon säteily ikkunalasin sisäpinnalla ylittää 50 W/m^2 . Tapauksissa, joissa rakennukseen asennetaan uudet ikkunat, etelän ja lännenpuoleisille julkisivuille asennetaan auringonsuojalasilla varustetut MSE-ikkunat ($g = 0,19$) ja muille julkisivuille hieman vähäisemmällä auringonsuojauksella varustetut uudet MSE-ikkunat ($g = 0,36$). MSE-ikkuna on 2-puitteinen 3-lasinen ikkuna, jonka sisemmässä puitteessa on 2-lasinen umpiolasielementti.

Tapauksissa, joissa on avattavat tuuletusikkunat, tuuletusikkunoiden oletetaan olevan auki huonelämpötilan ylittäessä $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulkolämpötilan ollessa välillä $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Yhden hengen asuntojen tuuletusikkunoiden avaaminen ei vähennä vanhainkodin muiden tilojen ilmanvaihtuvuutta, koska asuntojen tulo- ja poistoilmavirrat on mitoitettu yhtä suuriksi ja kunkin asunnon ja käytävätilojen välinen ovi pidetään jatkuvasti kiinni. Tuuletusikkunoiden käyttöön liittyen on syytä lisäksi korostaa, että tuuletusikkunoiden avaaminen voi myös heikentää sisäilman laatua ja lisätä melutasoa, mikäli ulkoilman laatu on heikko ja rakennus sijaitsee meluisalla alueella.

Tapauksessa, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä (7. Kaihtimet + tilojen jäähdytys), kuhunkin oleskelutilaan ja asuntoon on asennettu jäähdyttävä huonelaite, jonka jäähdytyksen mitoitusteho on 45 W/m^2 . Tilojen jäähdytyksen asetusarvo on $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0, joten tapauksella voidaan kuvata joko tyypillistä vesilauhdutteista jäähdytysjärjestelmää tai ilmalämpöpumppuihin perustuvaa ratkaisua.

Taulukko 5.1. 80-luvun vanhainkodin simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Ei passiivisia auringonsuojaratkaisuja eikä aktiivista jäähdytystä ilmanvaihdossa tai tiloissa. Tuloilman min. lämpötila vakio $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Ei avattavia ikkunoita.
2. Matalampi tuloilman lämpötila	Kuin perustapaus, mutta tuloilman min. lämpötila kesällä $17 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Kaihtimet	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet.
4. Kaihtimet + uudet ikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja uudet auringonsuojalaseilla varustetut ikkunat etelä- ja länsijulkisivuilla sekä tavalliset uudet ikkunat muilla julkisivuilla
5. Kaihtimet + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja avattavat tuuletusikkunat.
6. Kaihtimet + tuuletusikkunat + uudet ikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet, uudet avattavat tuuletusikkunat sekä kaikki muut ikkunat uusia, kuten tapauksessa 4.
7. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet sekä tilojen aktiivinen jäähdytys.

Uudisvanhainkoti

Uudisvanhainkoti on varustettu MSE-tyyppisillä auringonsuojaikkunoilla, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,19 kaikissa simulointitapauksissa etelän- ja lännenpuoleisten julkisivujen osalta. Muiden julkisivujen ikkunoissa käytetään MSE-ikkunoita, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,36. Molempien ikkunatyyppien U-arvo on 1,0 W/m²,K. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 17 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,17 W/m²,K ja vaipan ilmavuotoluku q₅₀ on 2 m³/h,m².

Rakennus on varustettu vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä ja yhden hengen asuntojen tulo- ja poistoilmavirrat ovat 18 dm³/s,asunto (0,76 dm³/s,m²) samoin kuin 80-luvun vanhainkodissa. Koska rakennus on suunniteltu nykyisten rakentamismääräysten mukaisesti, kesäaikaisiin huonelämpötiloihin liittyvän määräyksen täyttäminen edellyttää aktiivisen jäähdytyksen käyttöä ilmanvaihdossa jokaisessa simuloitussa tapauksessa. Perustapauksen mukaisissa tapauksissa tuloilman sisäänpuhalluslämpötila on 17 °C kesäolosuhteissa.

Taulukossa 5.2 kuvataan uudisvanhainkodin simulointitapaukset. Perustapauksessa passiivisina auringonsuojaratkaisuuina käytetään sekä uloimpaan lasiväliin asennettuja kaihtimia että auringonsuojalaseja ja aktiivista ilmanvaihdon jäähdytystä. Perustapaus täyttää rakentamismääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen, jonka mukaan huoneitilojen simuloitu lämpötila ei saa ylittää 25 °C:tta yli 150 astetuntia, kun tapaus simuloidaan määräysten mukaisella vakioidulla käytöllä ja Etelä-Suomen keskimääräisiä sääolosuhteita kuvaavalla Vantaan energialaskennan testivuodella 2012 (Ympäristöministeriö 2017).

Simuloituissa tapauksissa kaihtimia ja tuuletusikkunoita käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin 80-luvun vanhainkodissa. Tapauksessa, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä (6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys), kuhunkin oleskelutilaan ja asuntoon on asennettu samanlainen jäähdyttävä huonelaite kuin 80-luvun vanhainkodissa ja tilojen jäähdytyksen asetusrarvo on 25 °C. Jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0 sekä ilmanvaihdon että tilojen jäähdytyksen osalta.

Taulukko 5.2. Uudisvanhainkodin simulointitapaukset.

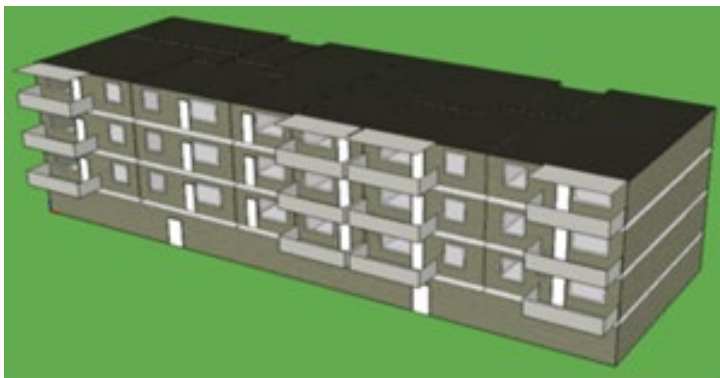
Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Ikkunoissa kaihtimet ja ilmanvaihdon tuloilmassa aktiivinen jäähdytys. Tuloilman lämpötila kesällä 17 °C. Auringonsuojalasit etelä- ja länsifasadeilla. Ei avattavia ikkunoita.
2. Ei kaihtimia	Kuin perustapaus, mutta ikkunoissa ei kaihtimia.
3. Kaihtimet + korkeampi tuloilman lämpötila	Kuin perustapaus, mutta tuloilman min lämpötila kesällä 19 °C.
4. Kaihtimet + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja avattavat tuuletusikkunat.
5. Ulkoinen aurinkosuoja (vaakalippa), ei kaihtimia	Kuin perustapaus, mutta käytössä 2m syvä vaakalippa etelän ja lännenpuoleisten ikkunoiden yläpuolella aurinkosuojana. Ei kaihtimia.
6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet sekä tilojen aktiivinen jäähdytys.

5.1.2 Kerrostalot

70-luvun kerrostalo

70-luvun asuinkerrostaloa kuvataan 4-kerroksisella betonirakenteisella kerrostalolla, jonka lämmitetty nettoala on 2596 m² (kuva 5.2). Rakennuksen kussakin kolmessa asuinkerroksessa on 7 huoneistoa, joiden pinta-alat vaihtelevat 34,5 m² (yksiö) ja 117 m² (4h + k) välillä.

Kuva 5.2. 70-luvun kerrostalon IDA ICE simulointimalli.



70-luvun kerrostalo on varustettu kirkkailla 3-lasisilla ikkunoilla, joiden U-arvo on $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,68. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 13 %. Ulkoseinien U-arvo on $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja vaipan ilmavuotoluku q_{50} on $6 \text{ m}^3/\text{h,m}^2$. Rakennus on varustettu vakioilmavirtaisella koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä ja koko rakennuksen ilmanvaihtuvuus on 0,51 1/h. Rakennus lämpiää kaukolämmöllä ja lämmönjako on toteutettu vesiradiaattoreilla. Tilojen lämmityksen asetusarvo on $21 \text{ }^\circ\text{C}$ paitsi märkätiloissa, joissa asetusarvo on $23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Taulukossa 5.3 kuvataan 70-luvun kerrostalon simulointitapaukset. Perustapauksessa ei käytetä mitään passiivisia auringonsuojaratkaisuja kuten kaihtimia. Tapauksissa, joissa kaihtimet on käytössä, ne on asennettu uloimpaan lasiväliin ja kaihtimet on käytössä, kun auringon säteily ikkunalasin sisäpinnalla ylittää 50 W/m^2 . Tapauksissa, joissa rakennukseen asennetaan uudet ikkunat, etelän ja lännenpuoleisille julkisivuille asennetaan auringonsuojalasilla varustetut MSE-ikkunat ($g = 0,19$) ja muille julkisivuille hieman vähäisemmällä auringonsuojauksella varustetut uudet MSE-ikkunat ($g = 0,36$). Tapauksissa, joissa on avattavat tuuletusikkunat, tuuletusikkunoiden oletetaan olevan auki huonelämpötilan ylitäessä $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulkolämpötilan ollessa välillä $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Tapauksessa, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä (6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys), kunkin asunnon olohuoneeseen on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu, jonka jäähdytyksen mitoitus-teho on 45 W/m^2 . Jäähdytyksen asetusarvo on $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ja jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0. Kaikissa taulukon 5.3 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki, joka vähentää tilojen välisiä lämpötilaeroja. Väliovien ollessa auki, olohuoneessa sijaitseva ilmalämpöpumpun sisäyksikkö voi jäähdyttää myös makuuhuoneita tai muita tiloja.

Taulukko 5.3. 70-luvun kerrostalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Ei passiivisia auringonsuojaratkaisuja eikä aktiivista jäähdytystä tiloissa tai avattavia ikkunoita. Käytössä kon. poistoilmanvaihtojärjestelmä.
2. Kaihtimet	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet.
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja avattavat tuuletusikkunat.
4. Kaihtimet + uudet ikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja uudet ikkunat.
5. Kaihtimet + uudet ikkunat + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet, uudet ikkunat sekä uudet avattavat tuuletusikkunat.
6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet sekä tilojen aktiivinen jäähdytys.

Uudiskerrostalo

Uudisasuinkerrostaloa kuvataan 4-kerroksisella betonirakenteisella kerrostalolla, jonka lämmitetty nettoala on 1944 m² (kuva 5.3). Rakennuksen kussakin kolmessa asuinkerroksessa on 5 huoneistoa, joiden pinta-alat vaihtelevat 35 m² (yksiö) ja 96 m² (4h + k) välillä.

Kuva 5.3. Uudiskerrostalon IDA ICE simulointimalli.



Uudiskerrostalo on varustettu MSE-tyyppisillä auringonsuojaikkunoilla, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,19 kaikissa simulointitapauksissa etelän- ja lännenpuoleisten julkisivujen osalta. Muiden julkisivujen ikkunoissa käytetään MSE-ikkunoita, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,36. Molempien ikkunatyyppien U-arvo on 1,0 W/m²,K. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 14 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,17 W/m²,K ja vaipan ilmavuotoluku q₅₀ on 2 m³/h,m².

Rakennus on varustettu keskitetyllä koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä, jonka tuloilmakanavat on lämmöneristetty kanavistossa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen estämiseksi. Koko rakennuksen ilmanvaihtuvuus on 0,55 1/h ja kaikkien makuuhuoneiden tuloilmavirta on 12 dm³/s ilmanvaihdon normaalilla käyttönopeudella. Ilmanvaihtoa tehostetaan 30 % kesällä (1.6.–31.8.) yöaikaan (klo 22–06). Lisäksi kesällä lasketaan ilmanvaihdon tuloilman minimisisäänpuhalluslämpötilaa normaalista asetusarvosta (17 °C) 14 °C:een. Rakennus lämpiää kaukolämmöllä ja lämmönjako on toteutettu vesiradiaattoreilla. Tilojen lämmityksen asetusarvo on 21 °C paitsi märkätiloissa, joissa asetusarvo on 23 °C.

Taulukossa 5.4 kuvataan uudiskerrostalon simulointitapaukset. Perustapauksessa passiivisina auringonsuojaratkaisuuina käytetään sekä uloimpaan lasiväliin asennettuja kaihtimia sekä auringonsuojalaseja, mutta tapauksessa ei käytetä aktiivista jäähdytystä. Perustapaus täyttää rakentamismääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen, jonka mukaan huonetilojen simuloitu lämpötila ei saa ylittää 27 °C:tta yli 150 astetuntia, kun tapaus simuloidaan määräysten mukaisella vakioidulla käytöllä ja Etelä-Suomen keskimääräisiä sääolosuhteita kuvaavalla Vantaan energialaskennan testivuodella 2012 (Ympäristöministeriö, 2017).

Simuloiduissa tapauksissa kaihtimia ja tuuletusikkunoita käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin 70-luvun kerrostalossa. Tapauksessa, jossa käytetään aktiivista jäähdytystä ilmanvaihdossa (4. Kaihtimet + ilmanvaihdon jäähdytys), ilmanvaihdon ilmavirrat ja sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvot ovat samoja kuin perustapauksessa. Tapauksessa, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä (5. Kaihtimet + tilojen jäähdytys), kunkin asunnon olohuoneeseen on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu, jonka jäähdytyksen mitoitusteho on 45 W/m^2 ja jäähdytyksen asetusarvo $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0 sekä ilmanvaihdon että tilojen jäähdytyksen osalta. Kaikissa taulukon 5.4 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki.

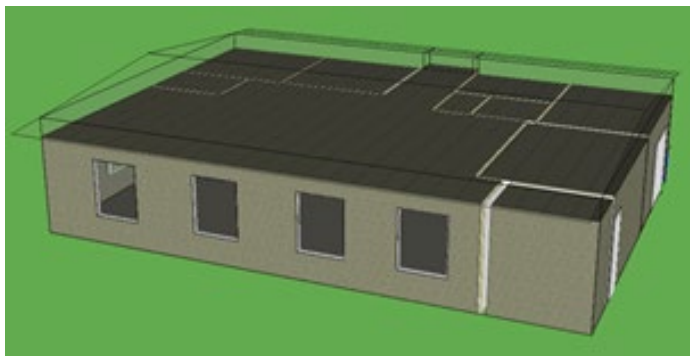
Taulukko 5.4. Uudiskerrostalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Kaihtimet ikkunoissa ja auringonsuojalasit etelä- ja länsifasadeilla. Ei aktiivista jäähdytystä tiloissa tai ilmanvaihdossa eikä avattavia ikkunoita. Kesällä tuloilman min. lämpötila $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ja käytössä yöaikainen 30% ilmanvaihdon tehostus.
2. Ei kaihtimia	Kuin perustapaus, mutta ikkunoissa ei kaihtimia
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä avattavat tuuletusikkunat.
4. Kaihtimet + ilmanvaihdon jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä ilmanvaihdon tuloilman jäähdytys.
5. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä tilojen aktiivinen jäähdytys.

5.1.3 Pientalot

60-luvun pientalo

60-luvun pientaloa kuvataan 1-kerroksisella puurunkoisella maavaraisella betonirakenteisella alapohjalla varustetulla pientalolla, jonka lämmitetty nettoala on 135 m^2 (kuva 5.4). Pientalo on varustettu kirkkailla 2-lasisilla ikkunoilla, joiden U-arvo on $2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,76. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 12 %. Ulkoseinien U-arvo on $0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja vaipan ilmavuotoluku q_{50} on $6 \text{ m}^3/\text{h,m}^2$. Rakennus on varustettu vakioilmavirtaisella koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä ja koko rakennuksen ilmanvaihtuvuus on $0,50 \text{ 1/h}$. Rakennuksessa on suora sähkölämmitys radiaattoreilla toteutettuna ja tilojen lämmityksen asetusarvo on $21 \text{ }^\circ\text{C}$ paitsi märkätiloissa, joissa asetusarvo on $23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuva 5.4. 60-luvun pientalon IDA ICE simulointimalli.

Taulukossa 5.5 kuvataan 60-luvun pientalon simulointitapaukset. Perustapauksessa ei käytetä mitään passiivisia auringonsuojaratkaisuja kuten kaihtimia. Tapauksissa, joissa kaihtimet on käytössä, ne on asennettu ikkunalasien väliin. Simuloiduissa tapauksissa kaihtimia ja tuuletusikkunoita käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin muissakin erimerkkirakennuksissa. Tapauksissa, joissa rakennukseen asennetaan uudet ikkunat, uusien MSE-ikkunoiden auringon kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,36 ja U-arvo 1,0 W/m²K. Tapauksessa, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä (6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys), talon olohuoneeseen on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu, jonka jäähdytyksen mitoitusteho on 45 W/m². Jäähdytyksen asetusarvo on 23 °C ja jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0. Kaikissa taulukon 5.5 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki.

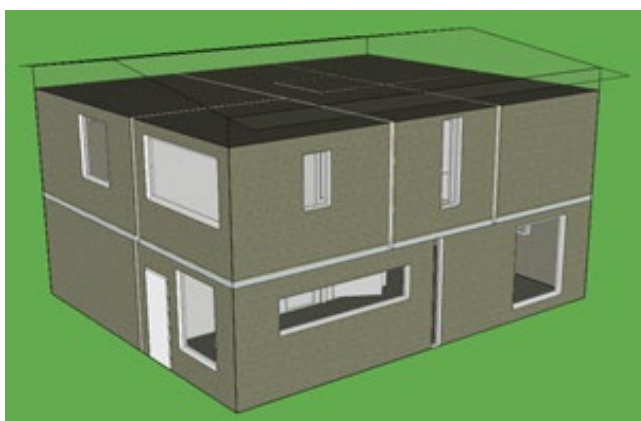
Taulukko 5.5. 60-luvun pientalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Ei passiivisia auringonsuojaratkaisuja eikä aktiivista jäähdytystä tiloissa tai avattavia ikkunoita. Käytössä kon. poistoilmanvaihtojärjestelmä.
2. Kaihtimet	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet.
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja avattavat tuuletusikkunat.
4. Kaihtimet + uudet ikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja uudet ikkunat.
5. Kaihtimet + uudet ikkunat + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet, uudet ikkunat sekä uudet avattavat tuuletusikkunat.
6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet sekä tilojen aktiivinen jäähdytys.

Uudispientalo

Uudispientaloa kuvataan 2-kerroksisella puurunkoisella maavaraisella betonirakenteisella alapohjalla varustetulla pientalolla, jonka lämmitetty nettoala on 180 m² (kuva 5.5). Pientalo on varustettu MSE-ikkunoilla, joiden U-arvo on 1,0 W/m²,K ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) 0,36. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 14 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,17 W/m²,K ja vaipan ilmavuotoluku q_{50} on 4 m³/h,m². Rakennus on varustettu vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmällä. Koko rakennuksen ilmanvaihtuvuus on 0,51 1/h ja kaikkien makuuhuoneiden tuloilmavirta on 12 dm³/s ilmanvaihdon käyttönopeudella. Kesäkuukausien aikana (1.6.–31.8.) ilmanvaihdon tuloilman minimisisäänpuhalluslämpötilaa lasketaan normaalista asetusarvosta (18 °C) 16 °C:een. Rakennus lämpiää maalämpöpumpulla ja tilojen lämmityksen asetusarvo on 21 °C paitsi märkätiloissa, joissa asetusarvo on 23 °C.

Kuva 5.5. Uudispientalon IDA ICE simulointimalli.



Taulukossa 5.6 kuvataan uudispientalon simulointitapaukset. Perustapauksessa ei käytetä mitään passiivisia auringonsuojaratkaisuja kuten kaihtimia tai aktiivista jäähdytystä. Rakentamismääräysten kesäaikaiset huonelämpötilavaatimukset (Ympäristöministeriö 2017) eivät koske uudispientaloja, joten niitä ei ole otettu huomioon simuloiduissa tapauksissa. Tapauksissa, joissa kaihtimet on käytössä, ne on asennettu uloimpien ikkunalasien väliin. Simuloiduissa tapauksissa kaihtimia ja tuuletusikkunoita käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin muissakin esimerkkirakennuksissa. Tapauksissa joissa käytetään ilmanvaihdon tehostusta, ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan kesällä (1.6.–31.8.) 30 % yöaikaan (klo 22–06). Tapauksessa, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä (6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys), talon yläkerran aulatilaa, joka on makuuhuoneiden vieressä, on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu. Jäähdytyksen asetusarvo on 23 °C, mitoitusteho 45 W/m² ja vuotuinen kylmäkerroin on 3,0. Kaikissa taulukon 5.5 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki.

Taulukko 5.6. Uudispientalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Ei passiivisia auringonsuojaratkaisuja eikä aktiivista jäähdytystä tiloissa tai ilmanvaihdossa eikä avattavia ikkunoita. Kesällä tuloilman min. lämpötila 16 °C.
2. Kaihtimet	Kuin perustapaus, mutta ikkunoissa on kaihtimet.
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä on kaihtimet ja avattavat tuuletusikkunat.
4. Kaihtimet + ilmanvaihdon tehostus yöllä	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet ja ilmanvaihdon 30% tehostus yöllä kesäaikaan.
5. Kaihtimet + ilmanvaihdon tehostus yöllä + tuuletusikkunat	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet, ilmanvaihdon 30% tehostus yöllä kesäaikaan ja avattavat tuuletusikkunat.
6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä kaihtimet sekä tilojen aktiivinen jäähdytys.

5.2 Rakennukset nykyilmastossa

5.2.1 Huonelämpötilat

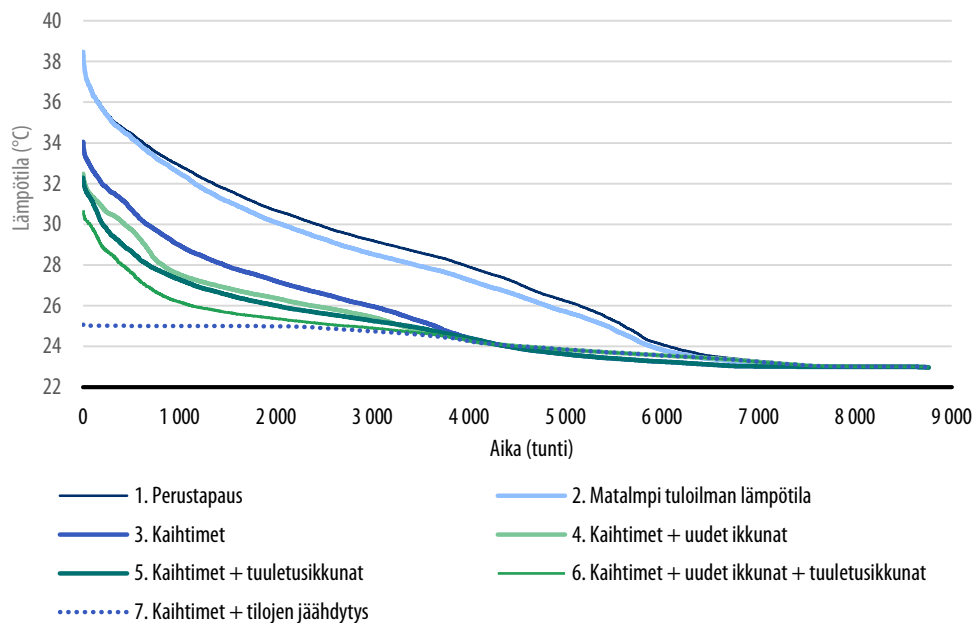
Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka ylitäminen torjuntakeinot vaikuttavat esimerkiksi rakennusten kuumimpien asuintilojen huonelämpötiloihin sekä 25, 27, 30 ja 32 °C ylittäviin huonelämpötilojen astetunteihin vuoden 2018 aikana. Vaikka tarkastelu keskittyy kuumimpiin asuintiloihin, antavat tulokset hyvin suuntaa myös muiden asuintilojen lämpöoloista, koska lämpötilaerot eri asuintilojen välillä ovat suhteellisen pieniä esimerkkirakennuksissa.

Vanhainkodit

Kuvassa 5.6 on esillä 80-luvun vanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon huonelämpötilan pysyvyyskäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.1) vuoden 2018 aikana. Kuva 5.6 osoittaa, että ilman kaihtimia tai aktiivista jäähdytystä varustetun perustapauksen korkeimmat huonelämpötilat ylittävät jopa 38 °C. Tapaus 2 (Matalampi tuloilman lämpötila) osoittaa, että ilmanvaihdon tuloilman lämmityksen asetusarvon laskeminen kesäolosuhteissa 2 °C perustapaukseen verrattuna, ei laske korkeimpia huonelämpötiloja. Kaihtimien käyttö tapauksessa 3 laskee huonelämpötilaa merkittävästi, mutta korkein lämpötila on edelleen noin 34 °C. Uusien paremmalla auringonsuojauksella varustettujen ikkunoiden asentamisella, kaihtimien ja tuuletusikkunoiden käytöllä (ks. tapaus 6) saadaan laskettua huonelämpötilaa merkittävästi, mutta korkeimmat huonelämpötilat

ylittävät niistä huolimatta asumisterveysasetuksen toimenpiderajan 30 °C (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Kaihtimilla ja aktiivisella tilojen jäähdytyksellä varustetussa tapauksessa 7 asuntojen huonelämpötilat eivät ylitä asetusrvoa 25 °C.

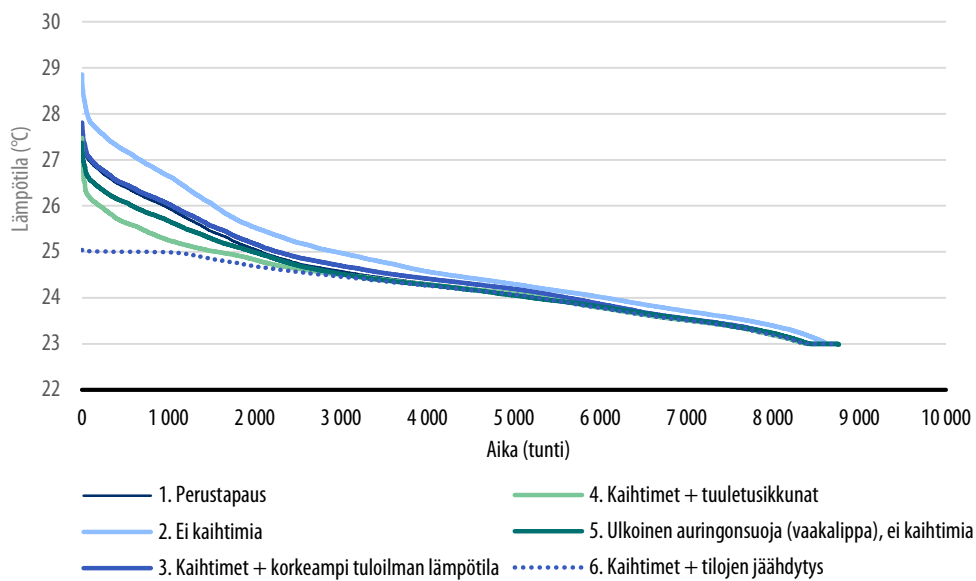
Kuva 5.6. 80-luvun vanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon lämpötilan pysyvyys vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Kuvassa 5.7 on esillä uudisvanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon huonelämpötilan pysyvyyskäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.2) vuoden 2018 aikana. Kuva 5.7 osoittaa, että huonelämpötilat ovat kaikissa simuloituissa tapauksissa huomattavasti matalammat, kuin 80-luvun vanhainkodissa eivätkä ylitä asumisterveysasetuksen toimenpiderajaa 30 °C, koska uudisvanhainkoti on varustettu kaikissa tapauksissa ilmanvaihdon tuloilman aktiivisella jäähdytyksellä. Uudisvanhainkodin perustapaus on varustettu myös kaihtimilla ja korkeimmat huonelämpötilat ovat hieman alle 28 °C. Ilman kaihtimia varustetun tapauksen 2 korkeimmat huonelämpötilat ovat noin 1 °C korkeammat kuin kaihtimilla varustetussa perustapauksessa, joten kaihtimien vaikutus huonelämpötilaan on auringonsuojaikkunoilla varustetussa uudisvanhainkodissa huomattavasti pienempi kuin alkuperäisillä ikkunoilla varustetussa 80-luvun vanhainkodissa. Tapaus 3 osoittaa, että ilmanvaihdon matalimman sisänpuhalluslämpötilan nostaminen kesäolosuhteissa kahdella celsiusasteella 19 °C:een ei juurikaan vaikuta korkeimpiin

huonelämpötiloihin, kun tapausta verrataan perustapaukseen. Sisäänpuhalluslämpötilan vaikutus korkeimpiin huonelämpötiloihin jää vähäiseksi tutkituissa tapauksissa, koska ilmanvaihdon ilmavirrat asuinnoissa ovat suhteellisen pieniä ($0,76 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{m}^2$). Kuva 5.7 osoittaa, että vaakalipan avulla toteutetulla ulkoisella auringonsuojauksella saadaan tapauksessa 5 leikattua korkeimpia huonelämpötila hieman enemmän kuin perustapauksessa uloimpaan ikkunaväliin asennetuilla kaihtimilla. Tapauksessa 5 kaihtimien sekä tuuletusikkunoiden käytöllä yhdessä ilmanvaihdon aktiivisella jäähdytyksen kanssa korkeimmat huonelämpötilan saadaan leikattua noin $27 \text{ }^\circ\text{C}$:een. Kaihtimilla ja tilojen sekä ilmanvaihdon aktiivisella jäähdytyksellä varustetussa tapauksessa 6 asuntojen huonelämpötilat eivät ylitä asetusarvoa $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuva 5.7. Uudisvanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon lämpötilan pysyvyys vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukoissa 5.7 ja 5.8 on esillä 80-luvun vanhainkodin ja uudisvanhainkodin kuumimman asunnon 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko 5.7 osoittaa, että asumisterveysasetuksen toimenpiderajan 30 °C ylittäviä astetunteja voidaan vähentää merkittävästi kaihtimien ja ikkunatuuletuksen käytöllä sekä uusien ikkunoiden asentamisella, mutta niillä ei pystytä alittamaan 30 °C:n toimenpiderajaa. Vanhainkodeille käytettävä 30 °C toimenpideraja saadaan alitettua tapauksessa 6, kun käytetään kaihtimia sekä tilojen aktiivista jäähdytystä.

Taulukko 5.7. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana 80-luvun vanhainkodin kuumimmassa yhden hengen asunnossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
1. Perustapaus	27279	17063	6465	2769
2. Matalampi tuloilman lämpötila	24448	14828	5609	2473
3. Kaihtimet	10704	4837	1013	144
4. Kaihtimet + uudet ikkunat	7429	2676	374	4
5. Kaihtimet + tuuletusikkunat	6128	1932	203	1
6. Kaihtimet + uudet ikkunat + tuuletusikkunat	3617	962	15	0
7. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	0	0	0	0

Taulukossa 5.8 olevat uudisvanhainkodin astetunnit ovat huomattavasti pienempiä, kuin taulukossa 5.7 esitetyt 80-luvun vanhainkodin astetunnit, johtuen ilmanvaihdon aktiivisesta jäädytyksestä uudisvanhainkodissa. Uudisvanhainkodin kuumimman asunnon 25 °C ylittävät astetunnit perustapauksessa (1931 °Ch) osoittavat, kuinka paljon äärimmäisen kuumaa hellevuosi 2018 sekä tilakohtaisesti määritellyt sisäiset lämpökuormat nostavat astetunteja verrattuna rakentamismääräysten vaatimustasoon 150 °Ch (Ympäristöministeriö 2017). Taulukon 5.8 perustapauksen 25 °C ylittävät astetunnit ovat alle 150 °C, kun tapaus simuloidaan energialaskennan testivuoden säätiedoilla sekä rakentamismääräysten mukaisella vakiodulla rakennuksen käytöllä. Uudisvanhainkodin perustapauksen sekä tapauksen 4 25 °C ylittäviä astetunteja vertaamalla havaitaan, että kuumimman asunnon tuuletusikkunan käytöllä saadaan vähennettyä sen asunnon astetunteja noin 1150 °C. Vastaavasti perustapauksen ja tapauksen 5 astetunteja vertaamalla havaitaan, että kaihtimien sijaan ulkoista auringonsuojausta (vaakalippa) käyttäen, päästään noin 500 °Ch matalampiin huonelämpöihin vuoden aikana.

Taulukko 5.8. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana uudisvanhainkodin kuumimmassa yhden hengen asunnossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

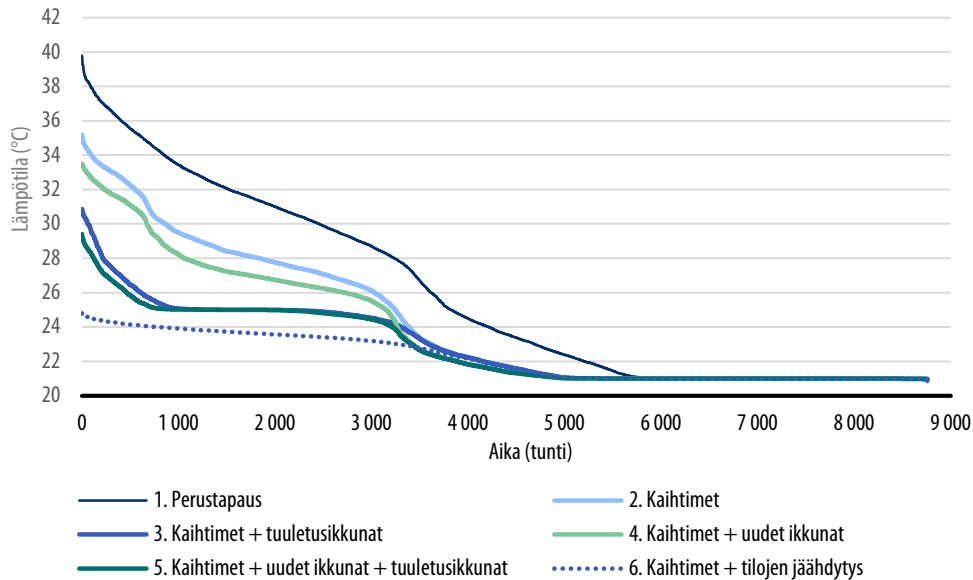
Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
1. Perustapaus	1931	16	0	0
2. Ei kaihtimia	3529	317	0	0
3. Kaihtimet + korkeampi tuloilman lämpötila	2133	24	0	0
4. Kaihtimet + tuuletusikkunat	778	2	0	0
5. Ulkoinen auringonsuoja (vaakalippa), ei kaihtimia	1423	2	0	0
6. Kaihtimet + tilojen jäädytys	0	0	0	0

Kerrostalot

Kuvassa 5.8 on esillä 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.3) vuoden 2018 aikana. Kuva 5.8 osoittaa, että ilman kaihtimia tai aktiivista jäädytystä varustetun perustapauksen korkeimmat huonelämpötilat ovat lähes 40 °C. Kaihtimien käyttö tapauksessa 2 laskee huonelämpötilaa merkittävästi, mutta korkein lämpötila on edelleen noin 35 °C. Kaihtimien käyttö sekä uusien paremmalla auringonsuojauksella varustettujen ikkunoiden asentaminen tapauksessa 4 laskee korkeimpia huonelämpötiloja hieman yli yhdellä celsiusasteella, mutta siitä huolimatta asumisterveysasetuksen toimenpiderajat 30 °C ja 32 °C ylittyvät siinä, sekä muissakin edellä mainituissa tapauksissa (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Kuva 5.8

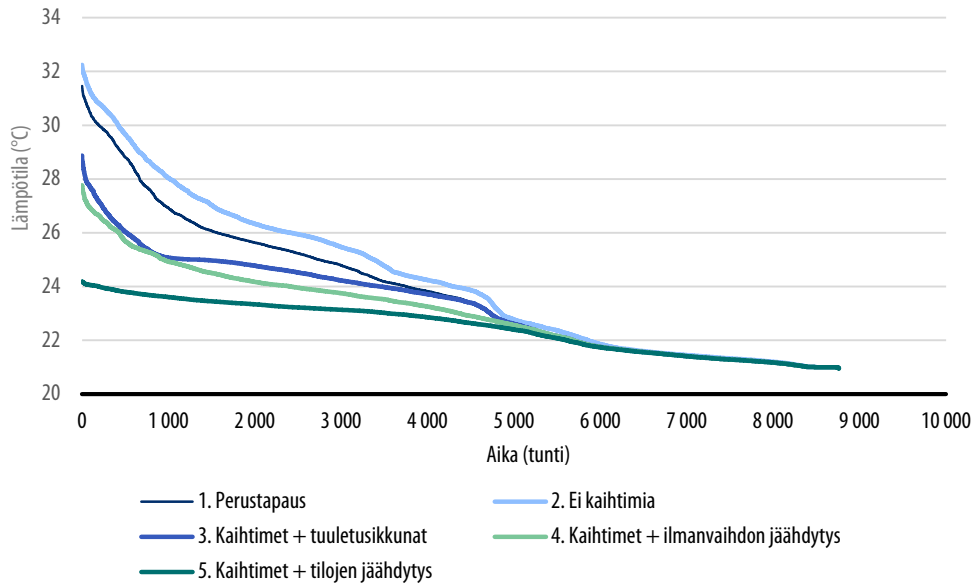
osoittaa, että kaihtimien ikkunatuuletuksen käytöllä saadaan tapauksessa 3 alitettua asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C, mutta kotihoidossa oleville vanhuksille sovellettava 30 °C toimenpideraja edelleen ylitetään. Ikkunatuuletuksen osalta on syytä korostaa sitä, että sen käyttö edellyttää asukkailta riittävää toimintakykyä ikkunoiden avaamiseen ja sulkemiseen. Tapauksessa 5 myös asumisterveysasetuksen 30 °C toimenpideraja alitetaan kaihtimien ja tuuletusikkunoiden käytöllä sekä uusien ikkunoiden asentamisella. Tapauksessa 6 kaihtimilla sekä asunnon olohuoneeseen asennetulla jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla saadaan kuumimman makuuhuoneen lämpötila pidettyä alle 25 °C tason.

Kuva 5.8. 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Kuvassa 5.9 on esillä uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.4) vuoden 2018 aikana. Kuva 5.9 osoittaa, että asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ylittyy vain tapauksessa 2, jossa ei käytetä mitään auringonsuojaratkaisuja, kuten kaihtimia. Perustapauksessa, jossa käytetään kaihtimia, asumisterveysasetuksen alempi toimenpideraja 30 °C kuitenkin ylittyy. Kuva osoittaa, että kaihtimien ja tuuletusikkunoiden käytöllä saadaan laskettua selvästi korkeimpia huonelämpötiloja, mutta korkeimmat huonelämpötila ovat edelleen lähes 29 °C. Tapauksessa 4, jossa käytetään kaihtimia ja ilmanvaihdon aktiivista jäähdytystä, huonelämpötiloja saadaan laskettua hieman edellä mainittuja tapauksia matalammalle tasolle ja korkeimmat lämpötilat saadaan pidettyä alle 28 °C. Tapauksella 4 voidaan kuvata esimerkiksi tilannetta, jossa ilmanvaihdon tuloilmaa jäähdytetään kesällä maalämpökaivojen avulla maalämpöpumpulla varustetussa kerrostalossa. Tapauksessa 5 kaihtimilla sekä asunnon olohuoneeseen asennetulla jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla saadaan kuumimman makuuhuoneen lämpötila pidettyä alle 25 °C tason.

Kuva 5.9. Uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukoissa 5.9 ja 5.10 on esillä 70-luvun kerrostalon ja uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko 5.9 osoittaa, että 70-luvun kerrostalossa tehokkain yksittäinen toimenpide astetuntien vähentämiseen lukuunottamatta aktiivisen jäähdytyksen käyttöä, on kaihtimien käyttö. Tapauksia 2–5 vertaamalla havaitaan, että kaihtimia käytettäessä tuuletusikkunoiden käytöllä voidaan vähentää hieman enemmän kaikkien eri lämpötilatasojen astetunteja, kuin uusien ikkunoiden asentamisella.

Taulukko 5.9. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana 70-luvun kerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
1. Perustapaus	24403	17159	8075	4081
2. Kaihtimet	12708	6748	2058	674
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	1884	602	23	0
4. Kaihtimet + uudet ikkunat	9357	4143	1145	144
5. Kaihtimet + tuuletusikkunat + uudet ikkunat	1213	244	0	0
6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	0	0	0	0

Taulukossa 5.10 olevat uudiskerrostalon astetunnit ovat huomattavasti pienempiä, kuin taulukossa 5.9 esitetyt 70-luvun vanhainkodin astetunnit, johtuen muun muassa paremmasta auringonsuojauksesta ja ilmanvaihdon yöaikaisesta tehostuksesta kesällä. Uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen 27 °C ylittävät astetunnit perustapauksessa (1812 °Ch) osoittavat, kuinka paljon äärimmäisen kuumaa hellevuosi 2018 sekä tilakohteisesti määritellyt sisäiset lämpökuormat nostavat astetunteja verrattuna rakentamismääräysten vaatimustasoon 150 °Ch (Ympäristöministeriö 2017). Taulukon 5.10 perustapauksen 27 °C ylittävät astetunnit ovat alle 150 °C, kun tapaus simuloidaan energialaskennan testivuoden säätiedoilla sekä rakentamismääräysten mukaisella vakioidulla rakennuksen käytöllä. Uudiskerrostalon perustapauksen sekä tapauksen 3 27 °C ylittäviä astetunteja vertaamalla havaitaan, että tuuletusikkunoiden käytöllä saadaan vähennettyä sen kuumimman makuuhuoneen astetunteja jopa noin 1670 °C. Vastaavasti perustapauksen ja tapauksen 3 ja 4 astetunteja vertaamalla havaitaan, että ilmanvaihdon aktiivisella jäähdytyksellä saadaan vähennettyä 25 ja 27 °C ylittäviä astetunteja jopa hieman enemmän kuin tuuletusikkunoiden käytöllä.

Taulukko 5.10. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana uudiskerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

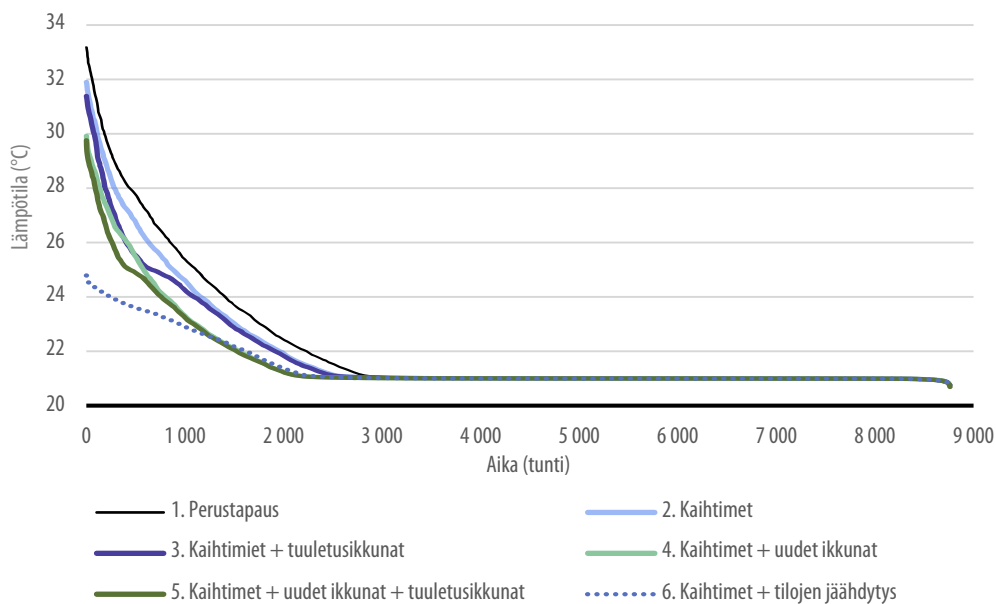
Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
1. Perustapaus	5200	1812	100	0
2. Ei kaihtimia	7829	2983	359	1
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	1242	146	0	0
4. Kaihtimet + ilmanvaihdon jäähdytys	895	21	0	0
5. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	0	0	0	0

Pientalot

Kuvassa 5.10 on esillä 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät simuloiduissa tapauksissa (ks. taulukko 5.5) vuoden 2018 aikana. Kuva 5.10 osoittaa, että ilman kaihtimia tai aktiivista jäähdytystä varustetun perustapauksen korkein huonelämpötila on noin 33 °C. Kaihtimien käyttö tapauksessa 2 tai lisäksi myös tuuletusikkunoiden käyttö tapauksessa 3 laskee korkeimpia huonelämpötiloja yli yhdellä celsiusasteella, jonka seurauksena asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ei ylity (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Kuvasta havaitaan, että kaihtimien käytöllä ja uusien ikkunoiden asentamisella tapauksessa 4 tai niiden lisäksi myös tuuletusikkunoiden käytöllä tapauksessa 5, asumisterveysasetuksen toimenpideraja 30 °C saadaan alitettua. Tapauksessa 6

kaihtimilla sekä talon olohuoneeseen asennetulla jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla saadaan kuumimman makuuhuoneen lämpötila pidettyä alle 25 °C tason.

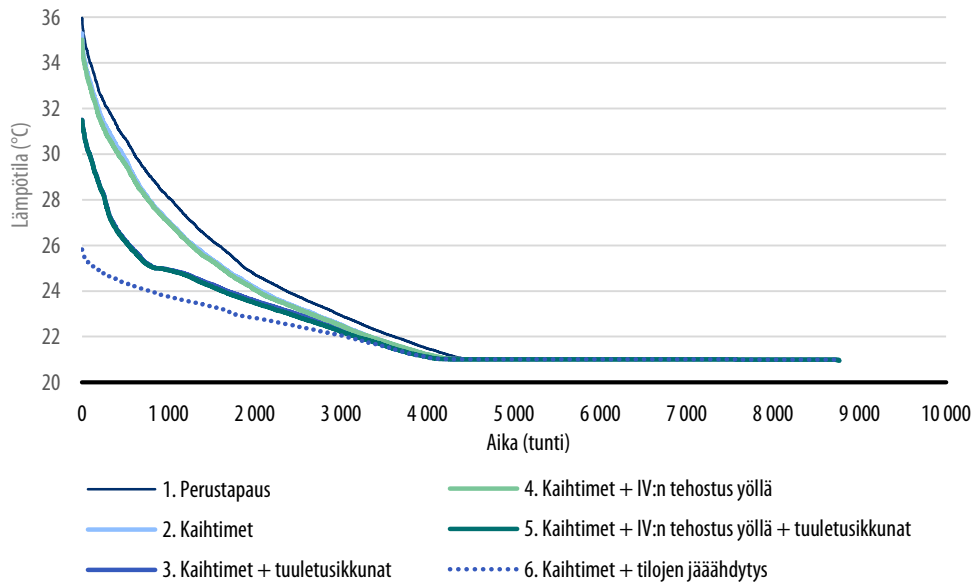
Kuva 5.10. 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Kuvassa 5.11 on esillä uudispientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.6) vuoden 2018 aikana. Muista simuloituista rakennustyypeistä poiketen, 2-kerroksisen uudispientalon kesäaikaiset kuumimman makuuhuoneen lämpötilat ovat selvästi korkeampia kuin vanhan 1-kerroksisen pientalon huonelämpötilat. Tämä johtuu siitä, että 60-luvun pientalon kuumin makuuhuone, kuten muutkin makuuhuoneet, sijaitsevat pohjoispuoleisella fasadilla, joita ikkunoiden kautta tulevat auringon lämpökuormat eivät juurikaan lämmitä. Sen sijaan uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa on suuri (3.75 m²) ikkuna, joka suuntautuu etelään.

Kuva 5.11 osoittaa, että ilman auringonsuojausta kuten kaihtimia olevan perustapauksen kuumimman makuuhuoneen korkein huonelämpötila on noin 36 °C. Korkeimmat huonelämpötilat laskevat noin yhdellä celsiusasteella, kun tapauksessa 2 käytetään kaihtimia tai lisäksi käytetään tapauksessa 4 ilmanvaihdon tehostusta yöllä kesäaikaan. Edellä mainituissa tapauksissa asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ylittyy. Kun tapauksessa 3 kaihtimien lisäksi käytetään myös tuuletusikkunoita tai tapauksessa 5 niiden lisäksi myös ilmanvaihdon tehostusta, saadaan asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C alitettua, mutta 30 °C toimenpideraja ylittyy edelleen. Tapauksessa 6 kaihtimilla sekä asunnon yläkerran aulaan asennetulla jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla saadaan kuumimman makuuhuoneen lämpötila pidettyä alle 26 °C tason.

Kuva 5.11. Uudispientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukoissa 5.11 ja 5.12 on esillä 60-luvun pientalon ja uudispientalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko 5.11 osoittaa, että 60-luvun pientalossa alkuperäisillä ikkunoilla varustetussa tapauksessa 2 kaihtimien käytöllä saadaan vähennettyä astetunteja perustapaukseen verrattuna lähes yhtä tehokkaasti kuin uusien ikkunoiden asentamisella tapauksessa 4. Tuuletusikkunan käytön vaikutus astetunteihin on tutkimassa 1-kerroksisessa pientalossa hieman pienempi kuin kaihtimien tai uusien ikkunoiden asentamisen riippumatta siitä, onko käytössä alkuperäiset vai uudet ikkunat.

Taulukko 5.11. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana 60-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
1. Perustapaus	3115	1396	266	31
2. Kaihtimet	2140	844	98	0
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	1403	552	49	0
4. Kaihtimet + uudet ikkunat	1110	296	0	0
5. Kaihtimet + uudet ikkunat + tuuletusikkunat	723	186	0	0
6. Kaihtimet + tilojen jäähditys	0	0	0	0

Taulukossa 5.12 olevat uudispientalon astetunnit ovat huomattavasti korkeampia, kuin taulukossa 5.11 esitetyt 60-luvun pientalon astetunnit, johtuen merkittävästi suuremmista auringon lämpökuormista makuuhuoneessa. Taulukko osoittaa, että 2-kerroksisessa uudispientalossa tuuletusikkunoiden käyttö on tilojen aktiivista jäähdytystä lukuunottamatta selvästi tehokkain yksittäinen toimenpide astetuntien vähentämiseen. Ilmanvaihdon yöaikaisella 30 % tehostuksella kesäaikana on varsin pieni vaikutus astetunteihin.

Taulukko 5.12. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
1. Perustapaus	7240	4082	1331	438
2. Kaihtimet	5567	2961	850	227
3. Kaihtimet + tuuletusikkunat	1826	703	51	0
4. Kaihtimet + IV:n tehostus yöllä	5359	2794	745	192
5. Kaihtimet + IV:n tehostus yöllä + tuuletusikkunat	1792	692	50	0
6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys	44	0	0	0

5.2.2 Energiankulutus

Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka yllämpenenisen torjuntakeinot vaikuttavat lämmitysenergian kulutukseen ja kuinka paljon aktiivisen jäähdytyksen käyttö kuluttaa sähköä esimerkkikohteissa vuoden 2018 aikana.

Vanhainkodit

Taulukossa 5.13 on 80-luvun vanhainkodin kaukolämmön ja sähkön vuotuiset kulutukset simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.1). Tulokset osoittavat, että kaihtimien käyttö alkuperäisten ikkunoiden kanssa lisää tapauksessa 3 tilojen ja ilmanvaihdon kaukolämmön kulutusta 8 % perustapaukseen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että simuloituissa tapauksissa kaihtimia oletetaan käytettävän myös lämmityskaudella samoin kuin kesällä. Mikäli kaihtimia käytetään vain yllämpenenemisen torjuntaan lämmityskauden ulkopuolella, lämmitystarve ei lisäännä kaihtimien käytön vuoksi. Tapauksessa 4 uusien ikkunoiden asentaminen vähentää tilojen ja ilmanvaihdon kaukolämmönkulutusta noin 18 % verrattuna tapaukseen 3. Vaikka auringon lämpökuormat vähenevät uusien ikkunoiden myötä,

lämmitystarve kokonaisuudessaan vähenee, koska uusien ikkunoiden lämpöhäviöt ovat merkittävästi pienemmät kuin vanhojen ikkunoiden. Tapaukset 3–6 osoittavat, että tuuletusikkunoiden käyttö yllämpenemisen torjuntaan ei vaikuta merkittävästi rakennuksen lämmitystarpeeseen. Tapaus 7 osoittaa, että tilojen aktiivisen jäähdytyksen vuotuinen sähkönkulutus on 4,1 kWh/m²,a, joka on noin 7 % rakennuksen muusta sähkönkulutuksesta.

Taulukko 5.13. 80-luvun vanhainkodin ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

	1. Perus- tapaus	2. Matalampi tuloilman lämpötila	3. Kaihtimet	4. Kaihtimet + uudet ikkunat	5. Kaihtimet + tuuletus- ikkunat	6. Kaihtimet + uudet ikkunat + tuuletus- ikkunat	7. Kaihtimet + tilojen jäähdytys
Kaukolämpö							
Tilat ja ilmanvaihto	66,0	67,4	71,2	58,6	71,4	58,6	71,5
LKV	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1
Sähkö							
Jäähdytys	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
LVI-apulaitteet	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
Valaistus	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
Huonelaitteet	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5

Taulukossa 5.14 on uudisvanhainkodin kaukolämmön ja sähkön vuotuiset kulutukset simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.2). Tulokset osoittavat, että kaihtimien käyttö uudisrakennuksen perustapauksessa hyvällä auringonsuojauksella varustettujen ikkunoiden kanssa kasvattaa kaukolämmön kulutusta huomattavasti vähemmän (1,8 %), kuin 80-luvun vanhainkodissa. Mutta, kuten edellä todettiin, kaihtimien käyttö ei lisää lämmitystarvetta, jos niitä käytetään vain yllämpenemisen torjuntaan lämmityskauden ulkopuolella. Tapaus 5 osoittaa, että kiinteä ulkoinen ikkunoiden ylläpuolelle asennettu aurinkolippa kasvattaa kaukolämmön kulutusta 1,5 %. Ilmanvaihdon aktiivisen jäähdytyksen sähkönkulutus on tapauksesta riippuen 1,3 tai 1,6 kWh/m²,a, joka on 2,4 tai 2,9 % rakennuksen muusta sähkön kulutuksesta. Tapauksessa 6 tilojen ja ilmanvaihdon aktiivinen jäähdytys kuluttaa sähköä yhteensä 2,9 kWh/m²,a, joka on 5,2 % rakennuksen muusta sähkönkulutuksesta.

Taulukko 5.14. Uudisvanhainkodin ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

	1. Perus- tapaus	2. Ei kaihtimia	3. Kaihtimet + korkeampi tuloilman lämpötila	4. Kaihtimet + tuuletus- ikkunat	5. Ulkoinen aurinkosuoja, ei kaihtimia	6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys
Kaukolämpö						
Tilat ja ilmanvaihto	34,5	33,9	34,1	34,6	34,4	34,6
LKV	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Sähkö						
Jäähdytys	1,6	1,6	1,3	1,6	1,6	2,9
LVI-apulaitteet	16,1	16,1	16,0	16,1	16,1	16,1
Valaistus	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
Huonelaitteet	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5

Kerrostalot

Taulukossa 5.15 on 70-luvun kerrostalon kaukolämmön ja sähkön vuotuiset kulutukset simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.3). Tulokset osoittavat, että kaihtimien käyttö alkuperäisten ikkunoiden kanssa kesäajan lisäksi myös lämmityskaudella lisää tapauksessa 2 tilojen ja ilmanvaihdon kaukolämmön kulutusta 7 % perustapaukseen verrattuna. Tapauksessa 4 uusien ikkunoiden asentaminen vähentää tilojen ja ilmanvaihdon kaukolämmönkulutusta noin 7 % verrattuna tapaukseen 2. Tulokset osoittavat, että tilojen aktiivinen jäähdytys nostaa tapauksessa 6 tilojen kaukolämmönkulutusta 1,5 %. Tämä johtuu siitä, että tapauksessa 6 kylpyhuoneiden lämmitystä pidetään päällä 23 °C lämpötila-asetusarvoa käyttäen lämmityskauden lisäksi myös kesällä. Kylpyhuoneiden lämmitystarve kasvaa hieman, koska tapauksessa 6 tilojen jäähdytyksen asetusarvo on myös 23 °C. Sama asia on havaittavissa myös uudiskerrostalon ja pientalojen energiankulutuksissa (ks. taulukot 5.16–5.18), koska kaikissa näissä kohteissa kylpyhuoneita lämmitetään myös kesällä saman periaatteen mukaisesti.

Lämmitystarpeen lisääntyminen aktiivisen jäähdytyksen vuoksi voidaan välttää sillä, että kylpyhuoneiden lämmityksen asetusarvoa lasketaan tai lämmitys lopetetaan kokonaan silloin, kun asunnossa käytetään aktiivista jäähdytystä yllälämpenemisen torjuntaan. Mikäli kylpyhuoneiden lämpötila halutaan esimerkiksi mukavuussyistä pitää vähintään 23 °C:ssa myös jäähdytyksen aikana, voidaan jäähdytyksen asetusarvoa nostaa esimerkiksi

25 °C:een, jolloin aktiivisen jäähdytyksen käyttö ei lisää kylpyhuoneiden lämmitystarvetta. Tapauksessa 6 tilojen aktiivisen jäähdytyksen vuotuinen sähkönkulutus on 4,2 kWh/m²,a, joka on noin 12 % asuntojen muusta sähkön kulutuksesta.

Taulukko 5.15. 70-luvun kerrostalon ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

	1. Perus- tapaus	2. Kaihtimet	3. Kaihtimet + tuuletus- ikkunat	4. Kaihtimet + uudet ikkunat	5. Kaihtimet + tuuletus- ikkunat + uudet ikkunat	6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys
Kaukolämpö						
Tilat	80,7	86,0	86,3	80,1	81,1	87,3
LKV	5,7	51,7	51,7	51,7	51,7	51,7
Sähkö						
Jäähdytys	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2
LVI-apulaitteet	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Valaistus	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
Huonelaitteet	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0

Taulukossa 5.16 on uudiskerrostalon kaukolämmön ja sähkön vuotuiset kulutukset simuloiduissa tapauksissa (ks. taulukko 5.4). Tulokset osoittavat, että kaihtimien käyttö uudisrakennuksen perustapauksessa hyvällä auringonsuojauksella varustettujen ikkunoiden kanssa kasvattaa kaukolämmön kulutusta 2 %, jos kaihtimia käytetään kesäajan lisäksi myös lämmityskaudella. Tapauksessa 4 ilmanvaihdon aktiivisen jäähdytyksen sähkönkulutus on 2,9 kWh/m²,a, joka on 8 % asuntojen muusta sähkönkulutuksesta, kun jäähdytys toteutetaan koneellisesti (ks. luku 5.1.2). Mikäli ilmanvaihdon jäähdytys toteutettaisiin maalämpöpumpulla varustetussa kohteessa vapaajäähdytystä hyödyntäen, olisi vapaajäähdytyksen sähkönkulutus noin 0,4 kWh/m²,a. Tapauksessa 5 tilojen aktiivinen jäähdytys kuluttaa sähköä 2,6 kWh/m²,a, joka on 7 % asuntojen muusta sähkönkulutuksesta.

Taulukko 5.16. Uudiskerrostalon ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

	1. Perus- tapaus	2. Ei kaihtimia	3. Kaihtimet + tuuletus- ikkunat	4. Kaihtimet + ilmanvaihdon jäähdytys	5. Kaihtimet + tilojen jäähdytys
Kaukolämpö					
Tilat ja ilmanvaihto	35,8	35,1	36,0	36,5	36,0
LKV	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1
Sähkö					
Jäähdytys	0,0	0,0	0,0	2,9	2,6
LVI-apulaitteet	6,9	6,9	6,9	7,0	6,9
Valaistus	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
Huonelaitteet	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0

Pientalot

Taulukossa 5.17 on 60-luvun pientalon vuotuiset sähkönkulutukset simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 5.5). Tulokset osoittavat, että kaihtimien käyttö alkuperäisten ikkunoiden kanssa kesäajan lisäksi myös lämmityskaudella lisää tapauksessa 2 tilojen lämmitys-sähkön kulutusta hieman yli 2 % perustapaukseen verrattuna. Tapauksessa 4 uusien ikkunoiden asentaminen vähentää tilojen lämmityssähkön kulutusta 6,5 % verrattuna tapaukseen 2. Tapauksessa 6 tilojen aktiivinen jäähdytys kuluttaa sähköä 3,8 kWh/m²,a, joka on 1,5 % suoralla sähkölämmityksellä varustetun pientalon muusta sähkönkulutuksesta.

Taulukko 5.17. 60-luvun pientalon ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

	1. Perus- tapaus	2. Kaihtimet	3. Kaihtimet + tuuletus- ikkunat	4. Kaihtimet + uudet ikkunat	5. Kaihtimet + uudet ikkunat + tuuletus- ikkunat	6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys
Sähkö						
Lämmityssähkö	175,9	180,1	180,5	168,4	168,6	182,8
LKV lämmityssähkö	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4
Jäähdytys	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8
LVI-apulaitteet	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
Valaistus	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Huonelaitteet	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8

Taulukossa 5.18 on uudispientalon vuotuiset sähkönkulutukset simuloiduissa tapauksissa (ks. taulukko 5.6). Tulokset osoittavat, että kaihtimien käyttö kasvattaa pientalon lämmityssähkönkulutusta alle 2 %, jos kaihtimia käytetään kesäajan lisäksi myös lämmityskaudella. Tapauksissa 4 ja 5 ilmanvaihdon 30 % tehostus yöllä kesäkuukausien aikana nostaa LVI-apulaitteiden sähkönkulutusta 6,5 %. Tapauksessa 6 tilojen aktiivinen jäähdytys kuluttaa sähköä 2,8 kWh/m²,a, joka on 3,9 % maalämpöpumpulla varustetun pientalon muusta sähkönkulutuksesta.

Taulukko 5.18. Uudispientalon ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) vuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

	1. Perus- tapaus	2. Kahtimet	3. Kaihtimet + tuuletus- ikkunat	4. Kaihtimet + IV:n tehostus yöllä	5. Kaihtimet + IV:n tehostus yöllä + tuuletusikkunat	6. Kaihtimet + tilojen jäähdytys
Sähkö						
Lämmityssähkö	24,0	24,4	24,7	24,5	24,7	24,7
LKV lämmityssähkö	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Jäähdytys	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8
LVI-apulaitteet	7,7	7,7	7,7	8,2	8,2	7,7
Valaistus	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Huonelaitteet	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7

5.3 Rakennukset nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa

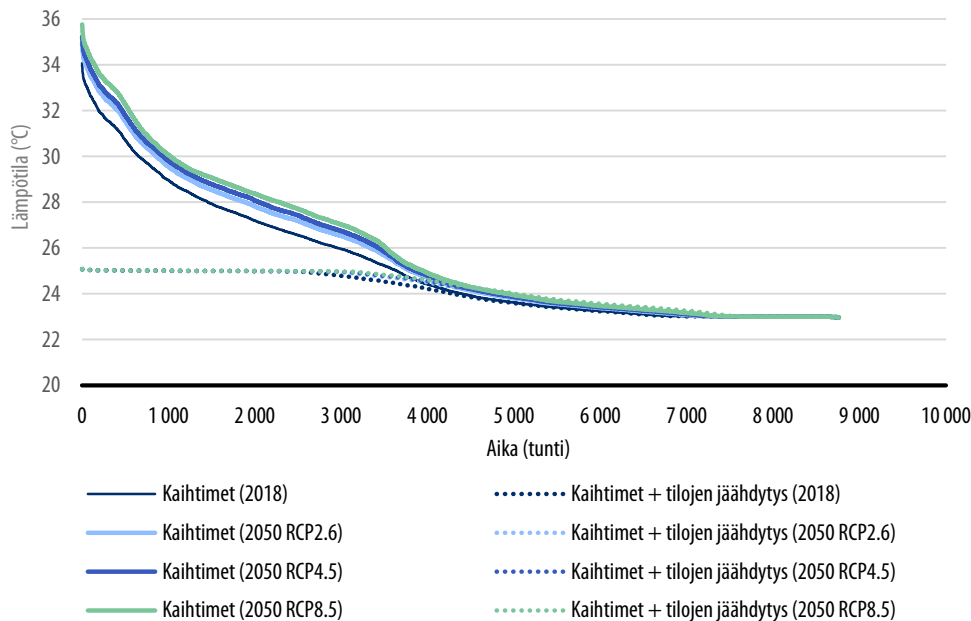
5.3.1 Huonelämpötilat

Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa vuoteen 2050 mennessä esimerkkirakennusten huonelämpötiloihin sekä 25, 27, 30 ja 32 °C ylittäviin huonelämpötilojen astetunteihin kuumen helle vuoden aikana, mikäli kolme vaihtoehtoista päästöskenaariota RCP2.6, RCP4.5 tai RCP8.5 toteutuvat (ks. luku 1.4). Huonelämpötilojen vertailutasona käytetään helle vuoden 2018 toteutuneilla säätiedoilla simuloituja huonelämpötiloja. Tässä luvussa käytetään Ilmatieteen laitoksen RASMI-hankkeessa (Jylhä ym. 2020) määrittämiä sääaineistoja (ks. luku 2.3.1).

Vanhainkodit

Kuvassa 5.12 on esillä 80-luvun vanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon huonelämpötilan pysyvyyssäyrät vuoden 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaarioilla määritetyn 2050 ilmastoä kuvaavan hellevuoden aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut tapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.1). Kuva osoittaa, että ilman aktiivista jäähdytystä vanhainkodin korkeimmat lämpötilat nousevat vuoden 2018 tasosta (34 °C) päästöskenaariosta riippuen noin 35–36 °C:een. Kuvassa 1000 kuumimman tunnin aikana huonelämpötilat nousevat ilman aktiivista jäähdytystä vuoteen 2050 mennessä keskimäärin 0,8, 1,0 tai 1,5 °C päästöskenaarioilla RCP2.5, RCP4.5 tai RCP8.5. Ilmastonmuutos nostaa huonelämpötiloja havaittavasti noin 4000 tunnin aikana vuodesta, kun aktiivista jäähdytystä ei ole käytössä. Kuva osoittaa, että valitulla tilojen aktiivisen jäähdytyksen tehomitoituksella (ks. luku 5.1.1) pystytään hallitsemaan lämpöoloja ylittämättä 25 °C lämpötilatasoa myös 2050 ilmaston hellesän aikana riippumatta päästöskenaariosta.

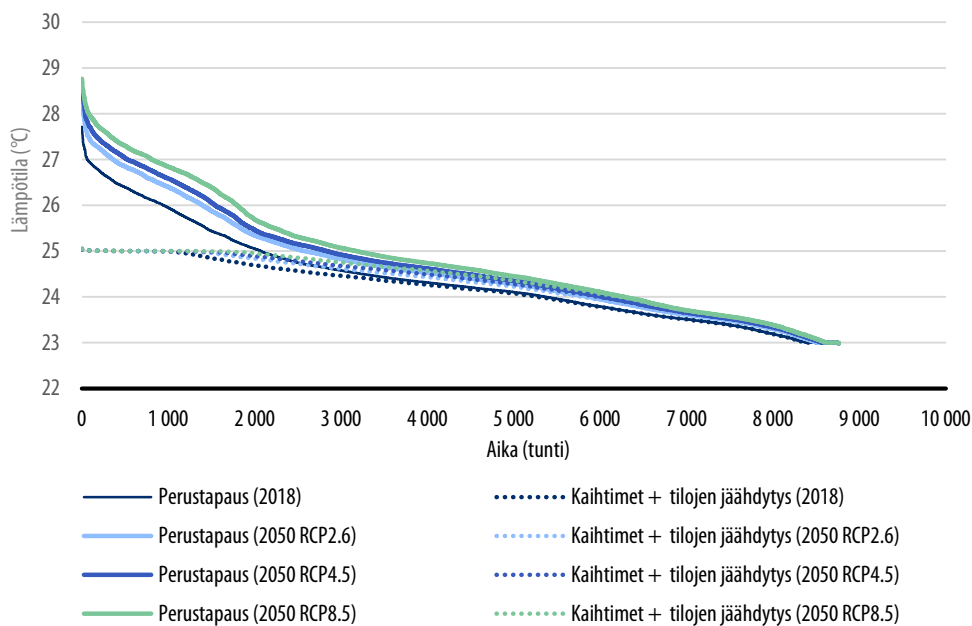
Kuva 5.12. 80-luvun vanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon lämpötilan pysyvyys nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoä kuvaavien hellevuosien 2018 ja 2050 aikana eri ratkaisuvaihtoehtojilla.



Kuvassa 5.13 on esillä uudisvanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon huonelämpötilan pysyvyyssäyrät vuoden 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaarioilla määritetyn 2050 ilmastoä kuvaavan hellevuoden aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut perustapaukset, joissa käytetään ilmanvaihdon aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että tilojen ja ilmanvaihdon aktiivista jäähdytystä

(kts taulukko 5.2). Kuva osoittaa, että kaihtimia ja ilmanvaihdon aktiivista jäähdytystä käyttäen uudisvanhainkodin korkeimmat lämpötilat nousevat vuoden 2018 tasosta (hieman alle 28 °C) päästöskenaariosta riippuen hieman yli 28 °C:sta noin 29 °C:een. Kuvassa 1000 kuumimman tunnin aikana huonelämpötilat nousevat tällöin vuoteen 2050 mennessä keskimäärin 0,5, 0,7 tai 0,9 °C päästöskenaarioilla RCP2.5, RCP4.5 tai RCP8.5. Ilmastonmuutos nostaa huonelämpötiloja havaittavasti lähes koko vuoden aikana, edellä mainituissa tapauksissa. Kuva osoittaa, että valitulla tilojen aktiivisen jäähdytyksen tehomitoituksella (ks. luku 5.1.1) pystytään hallitsemaan lämpöoloja ylittämättä 25 °C lämpötilatasoa myös 2050 ilmaston hellekesän aikana riippumatta päästöskenaariosta.

Kuva 5.13. Uudisvanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon lämpötilan pysyvyys nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoa kuvaavien hellevuosien 2018 ja 2050 aikana eri ratkaisuvaihtoehtoilla.



Taulukoissa 5.19 ja 5.20 on esillä 80-luvun vanhainkodin ja uudisvanhainkodin kuumimman asunnon 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit hellevuosien 2018 ja 2050 aikana kuvissa 5.12 ja 5.13 esitetyissä tapauksissa. Taulukko 5.19 osoittaa, että ilman aktiivista jäähdytystä olevien kaihtimilla varustettujen 80-luvun vanhainkodin tapausten astetunnit ovat kaikilta osin jo vuoden 2018 aikana erittäin korkeita ja ne nousevat enimmillään jopa yli 5 kertaisiksi vuoteen 2050 mennessä 32 °C:n osalta, mikäli korkein päästöskenaario RCP8.5 toteutuu. Asumisterveysasetuksen toimenpiderajan 30 °C (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015) ylittävät astetunnit nousevat vuoden 2018 tasosta 61, 85 ja 125 % vuoteen 2050 mennessä päästöskenaarioilla RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5.

Taulukko 5.19. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden aikana sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa 80-luvun vanhainkodin kuumimmassa yhden hengen asunnossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
Kaihtimet (2018)	10704	4837	1013	144
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2018)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP2.6)	13014	6439	1635	405
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP2.6)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP4.5)	13907	7128	1874	530
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP4.5)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP8.5)	15069	8067	2277	779
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP8.5)	0	0	0	0

Taulukko 5.20 osoittaa, että kaihtimilla ja ilmanvaihdon aktiivisella jäähdytyksellä varustetun uudisvanhainkodin perustapauksen astetunnit ovat huomattavasti matalammat kuin 80-luvun vanhainkodin astetunnit ilman aktiivista jäähdytystä (ks. taulukko 5.19). Asumisterveysasetuksen toimenpideraja 30 °C ei ylitä 2050 mennessä millään päästöskenaariolla. Kun 27 °C lämpötilataso ylittävää astetunteja on vuoden 2018 aikana perustapauksessa vain 15 °Ch, niin ne nousevat enimmillään jopa yli 26 kertaisiksi vuoteen 2050 mennessä, mikäli korkein päästöskenaario RCP8.5 toteutuu. Esimerkiksi 25 °C ylittävät astetunnit nousevat vuoden 2018 tasosta 51, 75 ja 112 % vuoteen 2050 mennessä päästöskenaarioilla RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5.

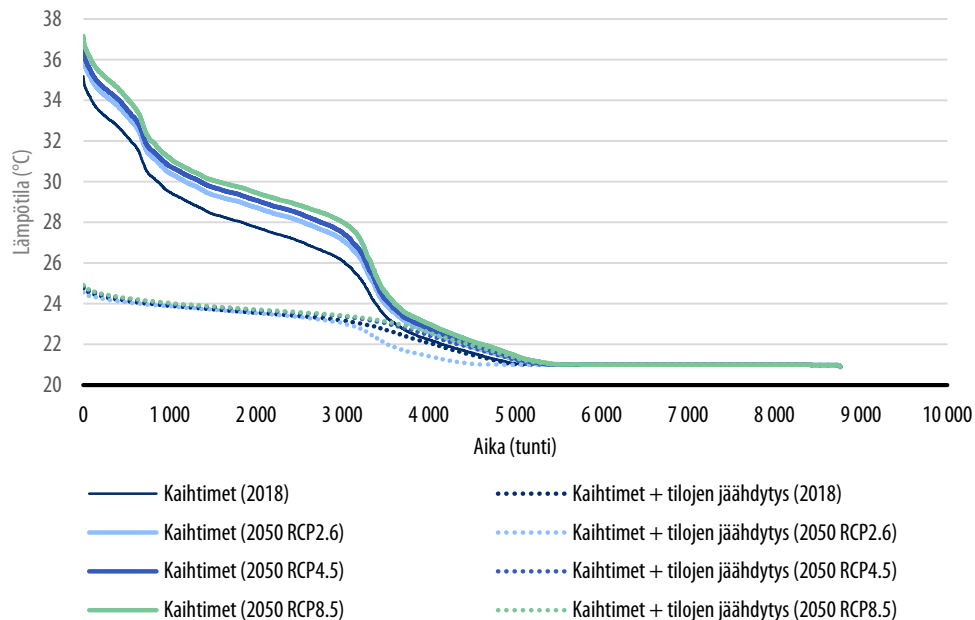
Taulukko 5.20. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden aikana sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa uudisvanhainkodin kuumimmassa yhden hengen asunnossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
Perustapaus (2018)	1918	15	0	0
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2018)	0	0	0	0
Perustapaus (2050 RCP2.6)	2894	123	0	0
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP2.6)	0	0	0	0
Perustapaus (2050 RCP4.5)	3346	221	0	0
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP4.5)	0	0	0	0
Perustapaus (2050 RCP8.5)	4065	395	0	0
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP8.5)	0	0	0	0

Kerrostalot

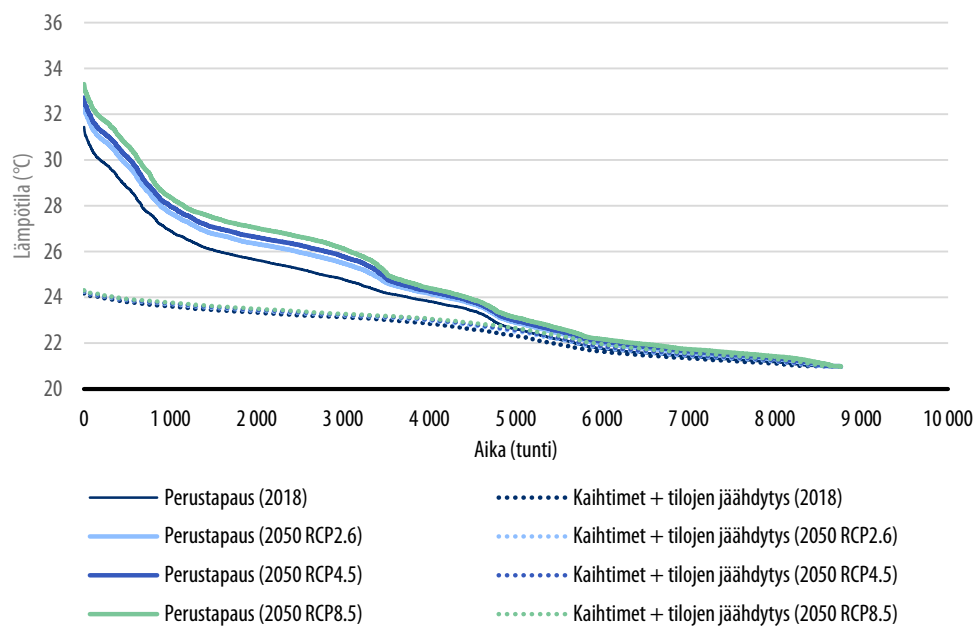
Kuvassa 5.14 on esillä 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät vuoden 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyt 2050 ilmastoja kuvaavan hellevuoden aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut tapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.3). Kuva osoittaa, että ilman aktiivista jäähdytystä 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen korkeimmat lämpötilat nousevat vuoden 2018 tasosta (35 °C) päästöskenaariosta riippuen noin 36–37 °C:een. Kuvassa 1000 kuumimman tunnin aikana huonelämpötilat nousevat ilman aktiivista jäähdytystä vuoteen 2050 mennessä keskimäärin 1,0, 1,3 tai 1,8 °C päästöskenaariolla RCP2.5, RCP4.5 tai RCP8.5. Ilmastonmuutos nostaa huonelämpötiloja havaittavasti hieman yli 5000 tunnin aikana vuodesta, kun aktiivista jäähdytystä ei ole käytössä. Kuva osoittaa, että valitulla tilojen aktiivisen jäähdytyksen tehomitoituksella (ks. luku 5.1.2) pystytään hallitsemaan lämpöoloja ylittämättä 25 °C lämpötilatasoa kuumimmassa makuuhuoneessa myös 2050 ilmaston hellekesän aikana riippumatta päästöskenaariosta.

Kuva 5.14. 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoja kuvaavien hellevuosien 2018 ja 2050 aikana eri ratkaisuvaihtoehtojilla.



Kuvassa 5.15 on esillä uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyskäyrät vuoden 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyn 2050 ilmastoja kuvaavan hellevuoden aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut perustapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.4). Kuva osoittaa, että ilman aktiivista jäähdytystä uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen korkeimmat lämpötilat nousevat vuoden 2018 tasosta (noin 31 °C) päästöskenaariosta riippuen noin 32–33 °C:een. Kuvassa 1000 kuumimman tunnin aikana huonelämpötilat nousevat ilman aktiivista jäähdytystä vuoteen 2050 mennessä keskimäärin 0,9, 1,3 tai 1,8 °C päästöskenaariolla RCP2.5, RCP4.5 tai RCP8.5. Ilmastonmuutos nostaa huonelämpötiloja havaittavasti lähes koko vuoden ajan, kun aktiivista jäähdytystä ei ole käytössä. Kuva osoittaa, että valitulla tilojen aktiivisen jäähdytyksen tehomitoituksella (ks. luku 5.1.2) pystytään hallitsemaan lämpöoloja ylittämättä 24 °C lämpötilatasoa kuumimmassa makuuhuoneessa myös 2050 ilmaston hellekesän aikana riippumatta päästöskenaariosta.

Kuva 5.15. Uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoja kuvaavien hellevuosien 2018 ja 2050 aikana eri ratkaisuvaihtoehtojilla.



Taulukoissa 5.21 ja 5.22 on esillä 70-luvun kerrostalon ja uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit hellevuosien 2018 ja 2050 aikana kuvissa 5.14 ja 5.15 esitetyissä tapauksissa. Taulukko 5.21 osoittaa, että ilman aktiivista jäähdystä olevien kaihtimilla varustettujen 70-luvun kerrostalon tapausten astetunnit ovat kaikilta osin jo vuoden 2018 aikana erittäin korkeita ja ne nousevat enimmillään jopa lähes 3 kertaiksi vuoteen 2050 mennessä asumisterveysasetuksen toimenpiderajan 32 °C:n osalta, mikäli korkein päästöskenaario RCP8.5 toteutuu. Asumisterveysasetuksen matalamman toimenpiderajan 30 °C ylittävät astetunnit nousevat vuoden 2018 tasosta 48, 69 ja 101 % vuoteen 2050 mennessä päästöskenaarioilla RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5.

Taulukko 5.21. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden aikana sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa 70-luvun kerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
Kaihtimet (2018)	12708	6748	2058	674
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2018)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP2.6)	15929	9486	3045	1307
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP2.6)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP4.5)	17103	10561	3469	1540
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP4.5)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP8.5)	18621	11970	4139	1956
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP8.5)	0	0	0	0

Taulukko 5.22 osoittaa, että ilman aktiivista jäähdytystä olevien kaihtimilla varustettujen uudiskerrostalon perustapauksen astetunnit ovat selvästi matalammat kuin 70-luvun kerrostalon astetunnit ilman aktiivista jäähdytystä (ks. taulukko 5.22). Asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ei ylity uudiskerrostalon perustapauksen kuumimmassa makuuhuoneessa vuoden 2018 sääolosuhteissa, mutta vuoteen 2050 mennessä se ylittyy päästöskenaariosta riippuen 4–77 °Ch. Asumisterveysasetuksen matalamman toimenpiderajan 30 °C ylittävät astetunnit nousevan vuoden 2018 tasosta noin 4, 6 ja 9 kertaisiksi päästöskenaarioilla RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5.

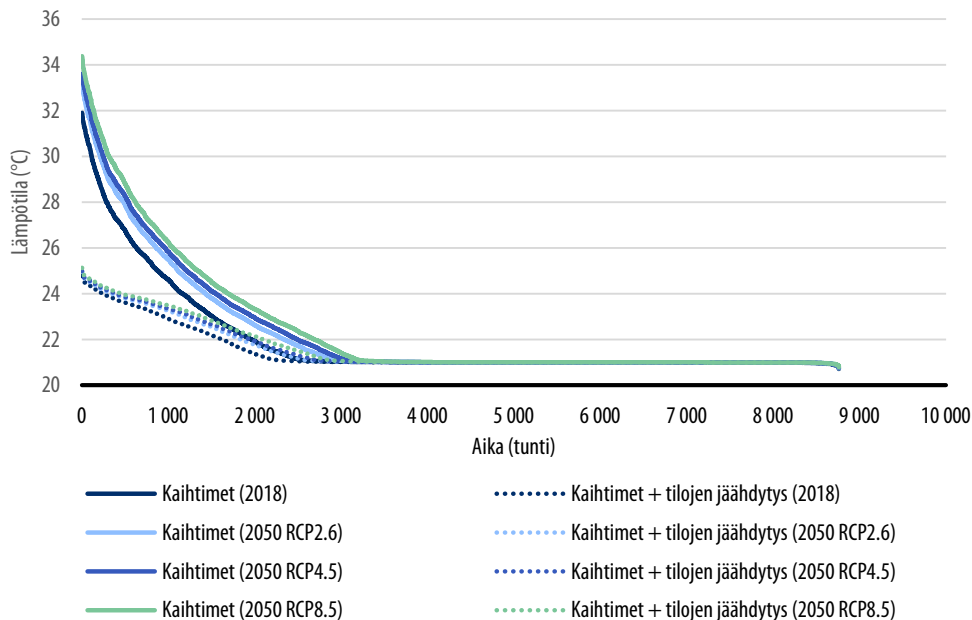
Taulukko 5.22. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden aikana sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa uudiskerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
Perustapaus (2018)	5200	1812	100	0
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2018)	0	0	0	0
Perustapaus (2050 RCP2.6)	7634	2836	414	4
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP2.6)	0	0	0	0
Perustapaus (2050 RCP4.5)	8661	3294	582	18
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP4.5)	0	0	0	0
Perustapaus (2050 RCP8.5)	10083	4111	905	77
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP8.5)	0	0	0	0

Pientalot

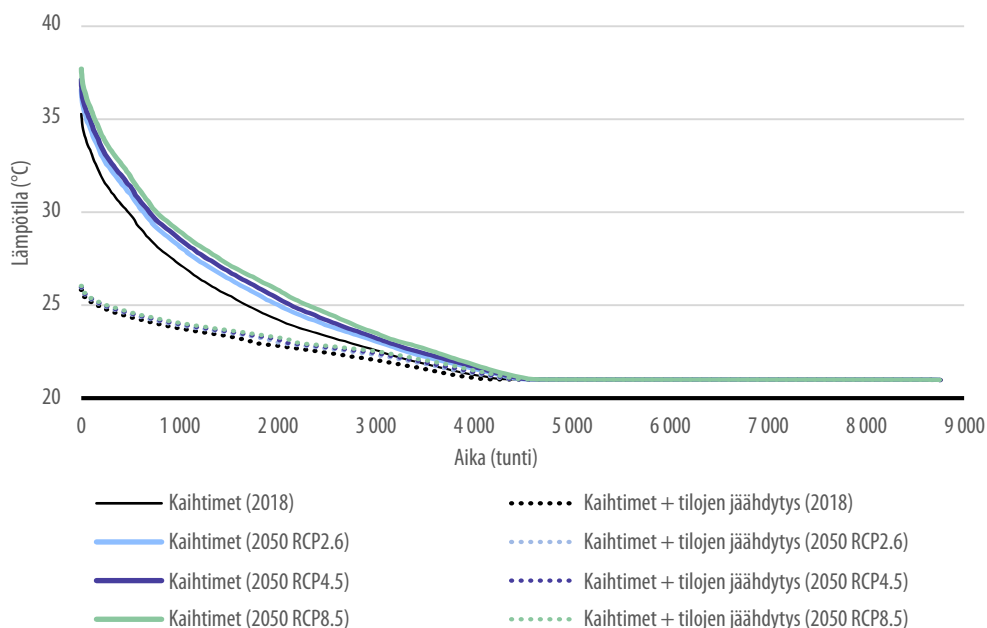
Kuvassa 5.16 on esillä 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät vuoden 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyn 2050 ilmastoja kuvaavan hellevuoden aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut perustapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.5). Kuva osoittaa, että ilman aktiivista jäähdytystä 60-luvunpientalon kuumimman makuuhuoneen korkeimmat lämpötilat nousevat vuoden 2018 tasosta (32 °C) päästöskenaariosta riippuen noin 33–34 °C:een. Kuvassa 1000 kuumimman tunnin aikana huonelämpötilat nousevat ilman aktiivista jäähdytystä vuoteen 2050 mennessä keskimäärin 1,0, 1,5 tai 2,0 °C päästöskenaarioilla RCP2.5, RCP4.5 tai RCP8.5. Ilmastonmuutos nostaa huonelämpötiloja havaittavasti noin 3000 tunnin ajan vuodesta, kun aktiivista jäähdytystä ei ole käytössä. Kuva osoittaa, että valitulla tilojen aktiivisen jäähdytyksen tehomitoituksella (ks. luku 5.1.3) pystytään hallitsemaan lämpöoloja ylittämättä 25 °C lämpötilatasoa kuumimmassa makuuhuoneessa myös 2050 ilmaston hellesän aikana riippumatta päästöskenaariosta.

Kuva 5.16. 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoja kuvaavien hellevuosien 2018 ja 2050 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Kuvassa 5.17 on esillä uudispientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyskäyrät vuoden 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyn 2050 ilmastoja kuvaavan hellevuoden aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut perustapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.6). Kuva osoittaa, että ilman aktiivista jäähdytystä uudispientalon kuumimman makuuhuoneen korkeimmat lämpötilat nousevat vuoden 2018 tasosta (noin 35 °C) päästöskenaariosta riippuen noin 37–38 °C:een. Kuvassa 1000 kuumimman tunnin aikana huonelämpötilat nousevat ilman aktiivista jäähdytystä vuoteen 2050 mennessä keskimäärin 1,0, 1,5 tai 2,1 °C päästöskenaarioilla RCP2.5, RCP4.5 tai RCP8.5. Ilmastonmuutos nostaa huonelämpötiloja havaittavasti noin 4500 tunnin ajan vuodesta, kun aktiivista jäähdytystä ei ole käytössä. Kuva osoittaa, että valitulla tilojen aktiivisen jäähdytyksen tehomitoituksella (ks. luku 5.1.3) pystytään hallitsemaan lämpöoloja ylitämättä 26 °C lämpötilatasoa kuumimmassa makuuhuoneessa myös 2050 ilmaston hellekesän aikana riippumatta päästöskenaariosta.

Kuva 5.17. Uudispientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoja kuvaavien helle vuosien 2018 ja 2050 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukoissa 5.23 ja 5.24 on esillä 60-luvun pientalon ja uudispientalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit hellevuosien 2018 ja 2050 aikana kuvissa 5.16 ja 5.17 esitetyissä tapauksissa. Taulukko 5.23 osoittaa, että ilman aktiivista jäähdystä olevan kaihtimilla varustetun 60-luvun pientalon makuuhuoneiden lämpötila ei ylitä asumisterveysasetuksen toimenpiderajaa 32 °C vuoden 2018 sääolosuhteissa, mutta vuoteen 2050 mennessä se ylittyy päästöskenaariosta riippuen 33–140 °Ch. Asumisterveysasetuksen matalamman toimenpiderajan 30 °C ylittävät astetunnit nousevan vuoden 2018 tasosta noin 3, 4 ja 6 kertaisiksi päästöskenaarioilla RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5.

Taulukko 5.23. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden aikana sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa 60-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
Kaihtimet (2018)	2140	844	98	0
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2018)	0	0	0	0
Kaihtimet 2050 RCP2.6)	3234	1493	296	33
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP2.6)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP4.5)	3675	1758	388	64
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP4.5)	0	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP8.5)	4360	2228	577	140
Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP8.5)	0	0	0	0

Taulukko 5.24 osoittaa, että ilman aktiivista jäähdystä olevien kaihtimilla varustettujen uudispientalon tapauksen astetunnit ovat huomattavan korkeita ja selvästi suurempia kuin 60-luvun pientalon astetunnit ilman aktiivista jäähdystä (ks. taulukko 5.23). Asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ylittyy uudispientalossa selvästi jo vuoden 2018 sääolosuhteissa, mutta vuoteen 2050 mennessä toimenpiderajan ylittävät astetunnit kasvavat jopa 4,5 kertaisiksi, mikäli korkein päästöskenaario RCP8.5 toteutuu. Asumisterveysasetuksen matalamman toimenpiderajan 30 °C ylittävät astetunnit nousevat vuoteen 2050 mennessä vuoden 2018 tasosta noin 2–3 kertaisiksi päästöskenaariosta riippuen. Aktiivista tilojen jäähdystä sekä kaihtimia käytettäessä 25 °C ylittävät astetuntimäärät ovat suhteellisen pieniä.

Taulukko 5.24. Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden aikana sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Astetunnit (°Ch) yli			
	25 °C	27 °C	30 °C	32 °C
Kaihtimet (2018)	5767	2961	850	227
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2018)	44	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP2.6)	7658	4354	1546	566
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP2.6)	68	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP4.5)	8472	4908	1816	719
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP4.5)	78	0	0	0
Kaihtimet (2050 RCP8.5)	9539	5673	2266	1022
Kaihtimet + tilojen jäähditys (2050 RCP8.5)	89	0	0	0

5.3.2 Lämpöviihtyvyys

Tässä luvussa tarkastellaan simuloituissa esimerkkirakennuksissa olevien asukkaiden kokemaa lämpöviihtyvyyttä hellekesän 2018 aikana ja kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa lämpöviihtyvyyteen vuoteen 2050 mennessä, mikäli kolme vaihtoehdoista päästöskenaariota RCP2.6, RCP4.5 tai RCP8.5 toteutuvat. Asukkaiden kokemaa lämpöviihtyvyyttä analysoidaan PMV-indeksi avulla (ks. luku 2.3.2) ja simuloituja PMV-indeksiarvoja verrataan SFS-EN 16798-1 standardin määrittämiin sisäympäristön laatuluokkiin I-III. Lämpöviihtyvyyttä analysoidaan vanhainkotien osalta kuumimmissa asunnoissa oleskelevien asukkaiden näkökulmasta ja muissa esimerkkirakennuksissa analysoidaan kuumimmissa makuuhuoneissa olevien henkilöiden kokemaa lämpöviihtyvyyttä. Vaikka tarkastelu keskittyy kuumimpiin asuintiloihin, antavat tulokset hyvin suuntaa myös muissa asuintiloissa koetusta lämpöviihtyvyydestä, koska lämpötilaerot eri asuintilojen välillä ovat suhteellisen pieniä esimerkkirakennuksissa.

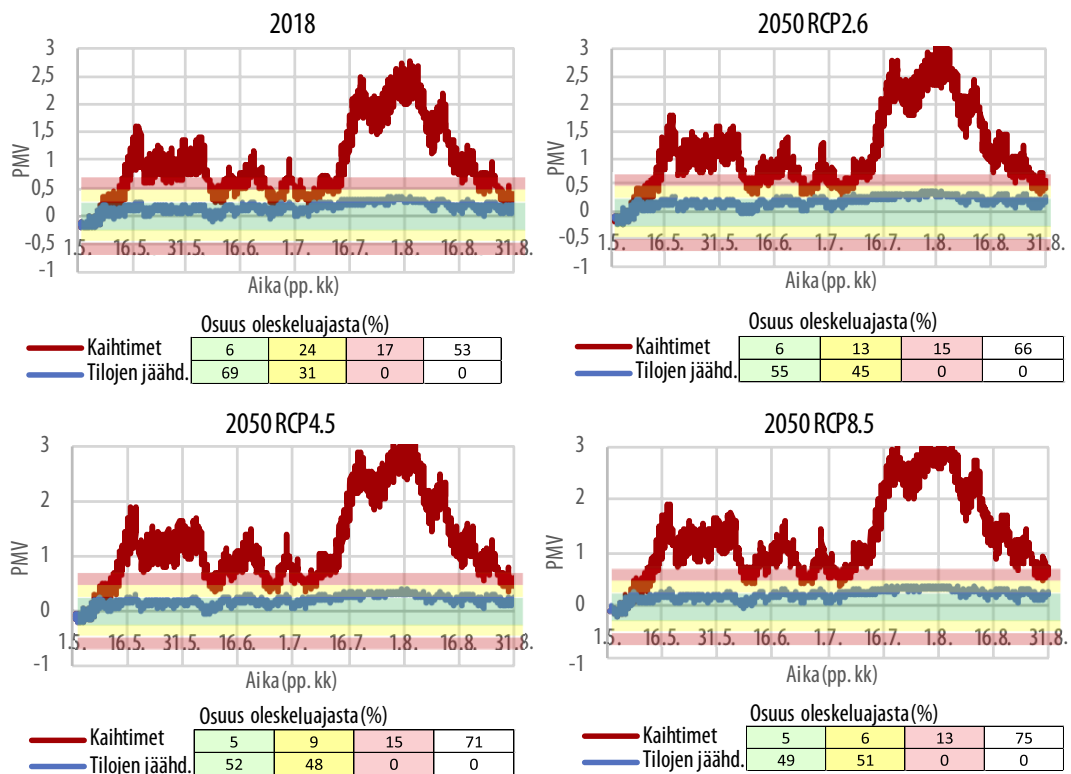
Vanhainkodit

Kuvassa 5.18 on esillä 80-luvun vanhainkodin kuumimmassa asunnossa koettu lämpöviihtyvyys hellekesän 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyn 2050 ilmasto kuvaavan hellekesän aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut tapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.1).

Kuva 5.18 osoittaa, että ilman aktiivista tilojen jäähdytystä 80-luvun vanhainkodin kuumimmassa asunnossa PMV-indeksin arvo ylittää korkeimmillaan selvästi arvon 2.5 (ks. taulukko 2.1) 2018 heinä-elokuun aikana. Kuva osoittaa, että koettu lämpöviihtyvyys on vain 6 % vuoden 2018 kesäkuukausien ajasta SFS-EN 16798-1 standardin laatuluokassa I, jota voidaan suositella iäkkäille ihmisille. Koettu lämpöviihtyvyys pysyy tällöin vain 47 % ajasta sisäympäristön laatuluokassa III, joka kuvaa kohtalaista sisäympäristön tasoa ja jota voidaan soveltaa olemassa oleville rakennuksille. Vuoteen 2050 mennessä lämpöviihtyvyys pysyy sisäympäristön laatuluokassa III enää 24–34 % kesäkuukausien ajasta riippuen päästöskenaariosta ja PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan 3 kaikilla päästöskenaarioilla.

Mikäli 80-luvun vanhainkoti on varustettu aktiivisella tilojen jäähdytyksellä, lämpöviihtyvyys pysyy laatuluokassa I 69 % 2018 kesäkuukausien ajasta ja vuoteen 2050 mennessä siinä pysytään 55–49 % ajasta riippuen päästöskenaariosta. Lämpöviihtyvyys pystytään pitämään sekä 2018 että 2050 hellekesien aikana laatuluokassa II, jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille.

Kuva 5.18. Henkilön kokema lämpöaistimus (PMV) 80-luvun vanhainkodin kuumimmassa asunnossa kesäkuukausien aikana (1.5.–31.8.) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Taustaväreillä kuvataan SFS-EN 16798-1 standardin suositamia lämpöviihtyvyyden laatuluokkia: I (vihreä), II (keltainen), III (punainen) ja valkoinen taustaväri ei täytä I-III laatuluokkia.

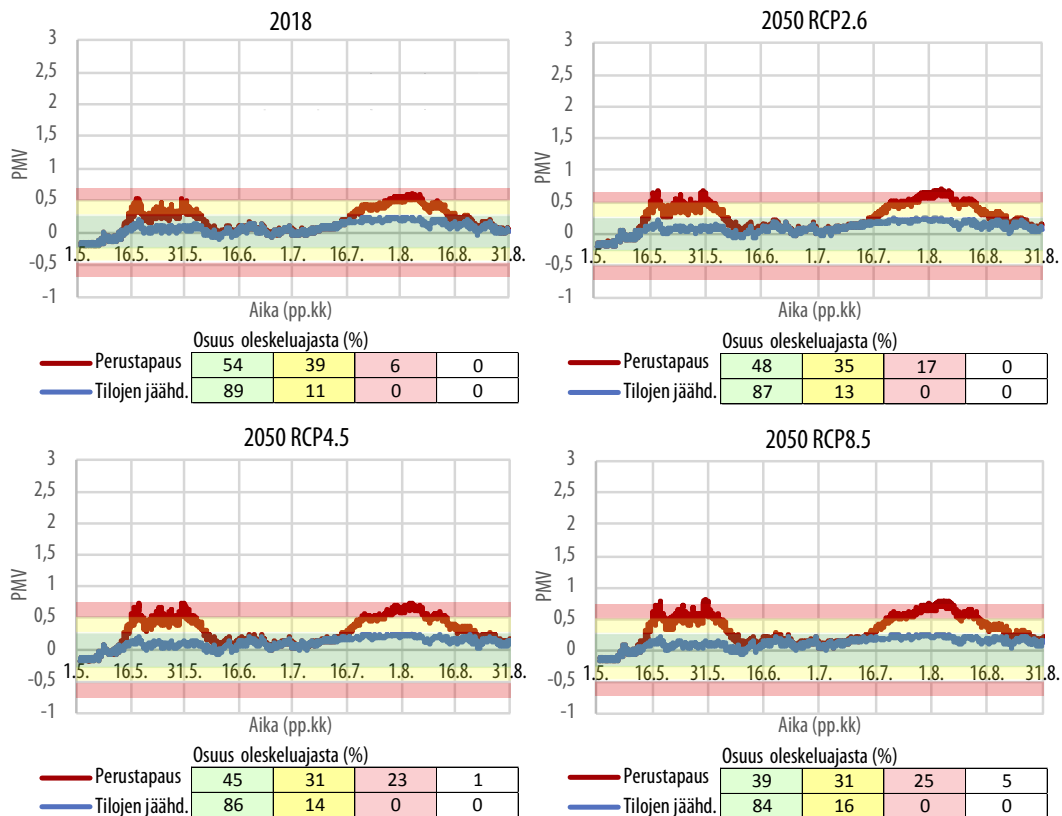


Kuvassa 5.19 on esillä uudisvanhainkodin kuumimmassa asunnossa koettu lämpöviihtyvyys hellekesän 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaarioilla määritetyn 2050 ilmasto-kuvaavan hellekesän aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut perustapaukset, joissa käytetään myös ilmanvaihdon aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset (tilojen jäähdytys), joissa käytetään sekä kaihtimia että ilmanvaihdon ja tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.2).

Kuva 5.19 osoittaa, että kaihtimilla ja ilmanvaihdon aktiivisella jäähdytyksellä varustettu uudisvanhainkodin perustapauksen kuumimmassa asunnossa PMV-indeksi on jatkuvasti alle 0,7 (ks. taulukko 2.1) 2018 kesäkuukausien aikana. Kuva osoittaa, että koettu lämpöviihtyvyys on kuitenkin vain 54 % 2018 kesäkuukausien ajasta SFS-EN 16798-1 standardin laatuluokassa I, jota voidaan suositella iäkkäille ihmisille. Koettu lämpöviihtyvyys pysyy tällöin 93 % ajasta sisäympäristön laatuluokassa II, joka kuvaa keskitasoista sisäympäristön tasoa ja jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille. Vuoteen 2050 mennessä lämpöviihtyvyys pysyy sisäympäristön laatuluokassa II 70–83 % kesäkuukausien ajasta riippuen päästöskenaariosta ja PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan hieman yli 0,7 kaikilla päästöskenaarioilla.

Mikäli uudisvanhainkoti on varustettu kaihtimilla sekä aktiivisella ilmanvaihdon ja tilojen jäähdytyksellä, lämpöviihtyvyys pysyy laatuluokassa I 89 % 2018 kesäkuukausien ajasta ja vuoteen 2050 mennessä siinä pysytään 84–87 % ajasta riippuen päästöskenaariosta. Lämpöviihtyvyys pystytään pitämään sekä 2018 että 2050 hellekesien aikana laatuluokassa II, jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille.

Kuva 5.19. Henkilön kokema lämpöaistimus (PMV) uudisvanhainkodin kuumimmassa asunnossa kesäkuukausien aikana (1.5.–31.8.) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Taustaväreillä kuvataan SFS-EN 16798-1 standardin suositamia lämpöviihtyvyyden laatuluokkia: I (vihreä), II (keltainen) III (punainen) ja valkoinen taustaväri ei täytä I-III laatuluokkia.



Kerrostalot

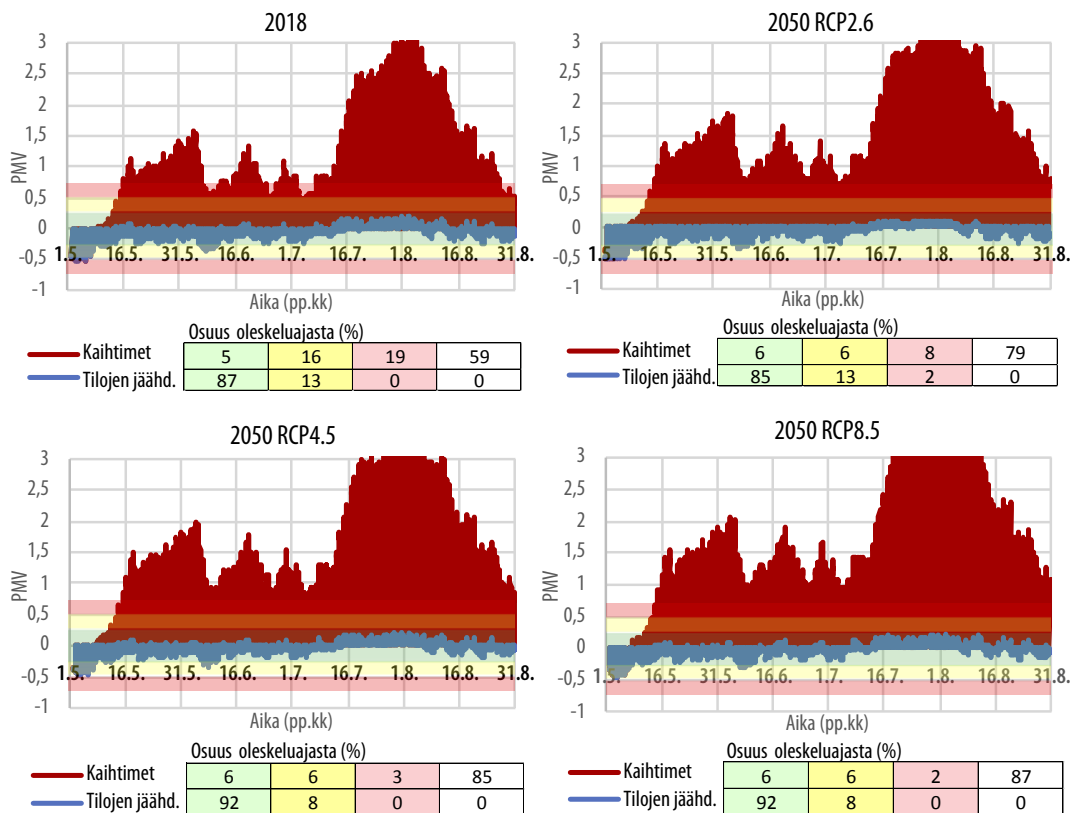
Kuvassa 5.20 on esillä 70-luvun kerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa koettu lämpöviihtyvyys hellekesän 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyn 2050 ilmastoä kuvaavan hellekesän aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut tapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.3).

Kuva 5.20 osoittaa, että ilman aktiivista tilojen jäähdytystä 70-luvun kerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa PMV-indeksin arvo saavuttaa korkeimmillaan arvon 3 (ks. taulukko 2.1) kesän 2018 aikana. Kuva osoittaa, että koettu lämpöviihtyvyys on vain 5 % vuoden 2018 kesäkuukausien ajasta SFS-EN 16798-1 standardin laatuluokassa I, jota voidaan suositella iäkkäille ihmisille. Koettu lämpöviihtyvyys pysyy tällöin vain 40 % ajasta

sisäympäristön laatuluokassa III, joka kuvaa kohtalaista sisäympäristön tasoa ja jota voidaan soveltaa olemassa oleville rakennuksille. Vuoteen 2050 mennessä lämpöihtiivyyys pysyy sisäympäristön laatuluokassa III enää 14–20 % kesäkuukausien ajasta riippuen päästöskenaariosta ja PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan 3 kaikilla päästöskenaarioilla.

Mikäli 70-luvun kerrostalo on varustettu aktiivisella tilojen jäähdytyksellä, lämpöihtiivyyys pysyy laatuluokassa I 87 % 2018 kesäkuukausien ajasta ja vuoteen 2050 mennessä siinä pysytään 85–92% ajasta riippuen päästöskenaariosta. Lämpöihtiivyyys pystytään pitämään sekä 2018 että 2050 hellekesien aikana vähintään 98 % ajasta laatuluokassa II, jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille.

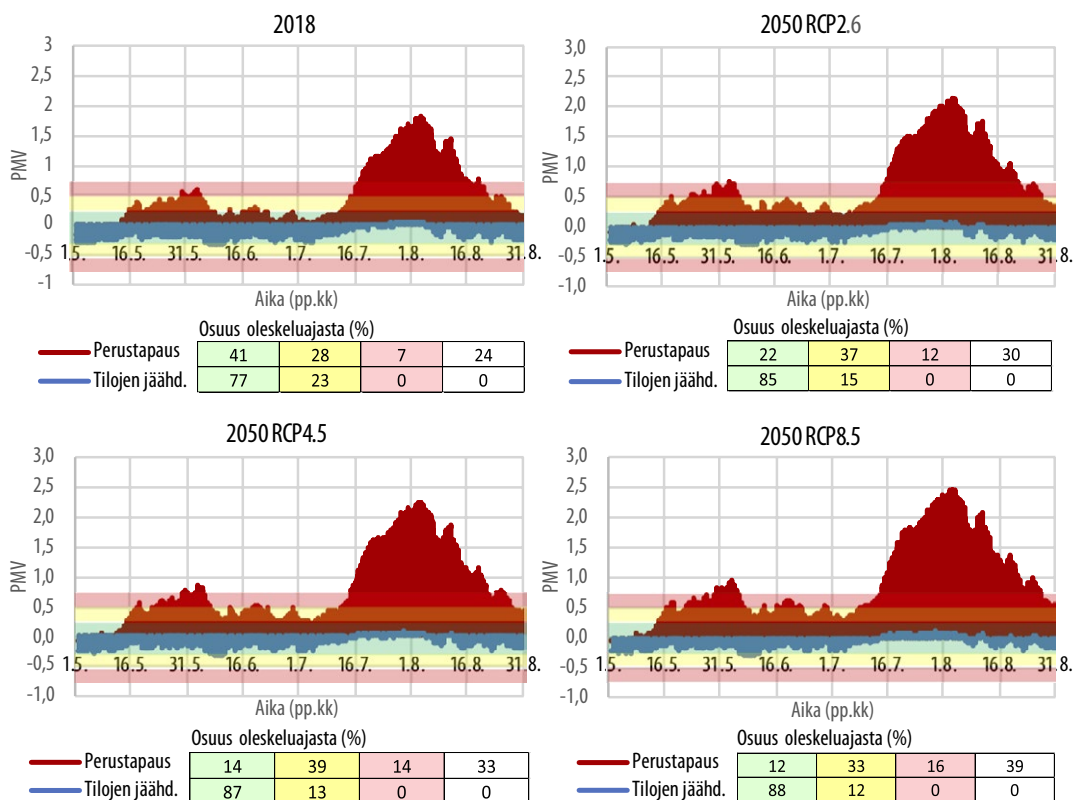
Kuva 5.20. Henkilöiden kokema lämpöaistimus (PMV) 70-luvun kerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa kesäkuukausien aikana (1.5.–31.8.) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Kuvassa PMV-indeksi saa arvon 0, jos koettu lämpöaistimus on neutraali tai makuuhuoneessa ei oleskella. Taustaväreillä kuvataan SFS-EN 16798-1 standardin suositamia lämpöihtiivyyden laatuluokkia: I (vihreä), II (keltainen), III (punainen) ja valkoinen taustaväri ei täytä I-III laatuluokkia.



Kuvassa 5.21 on esillä uudiskerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa koettu lämpöviihtyvyys hellekesän 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyn 2050 ilmasto- ja ilmastotilanteen kuvaavan hellekesän aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut perustapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (ks taulukko 5.4).

Kuva 5.21 osoittaa, että ilman aktiivista tilojen jäähdytystä uudiskerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan hieman alle 2 (ks. taulukko 2.1) kesän 2018 aikana. Kuva osoittaa, että koettu lämpöviihtyvyys on vain 41 % vuoden 2018 kesäkuukausien ajasta SFS-EN 16798-1 standardin laatuluokassa I, jota voidaan suositella iäkkäille ihmisille. Koettu lämpöviihtyvyys pysyy tällöin 69 % ajasta sisäympäristön laatuluokassa II, joka kuvaa keskitasoista sisäympäristön tasoa ja jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille. Vuoteen 2050 mennessä lämpöviihtyvyys pysyy sisäympäristön laatuluokassa II 45–59 % kesäkuukausien ajasta riippuen päästöskenaariosta ja PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan yli 2 kaikilla päästöskenaariolla.

Kuva 5.21. Henkilöiden kokema lämpöviihtyvyys (PMV) uudiskerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa kesäkuukausien aikana (1.5.–31.8.) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Kuvassa PMV-indeksi saa arvon 0, jos koettu lämpöviihtyvyys on neutraali tai makuuhuoneessa ei oleskella. Taustaväreillä kuvataan SFS-EN 16798-1 standardin suosittelemia lämpöviihtyvyyden laatuluokkia: I (vihreä), II (keltainen), III (punainen) ja valkoinen taustaväri ei täytä I-III laatuluokkia.



Mikäli uudiskerrostalo on varustettu aktiivisella tilojen jäähdytyksellä, lämpöviihtyvyys pysyy laatuluokassa I 77 % 2018 kesäkuukausien ajasta ja vuoteen 2050 mennessä siinä pysytään 85–88 % ajasta riippuen päästöskenaariosta. Lämpöviihtyvyys pystytään pitämään sekä 2018 että 2050 hellekesien aikana laatuluokassa II, jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille.

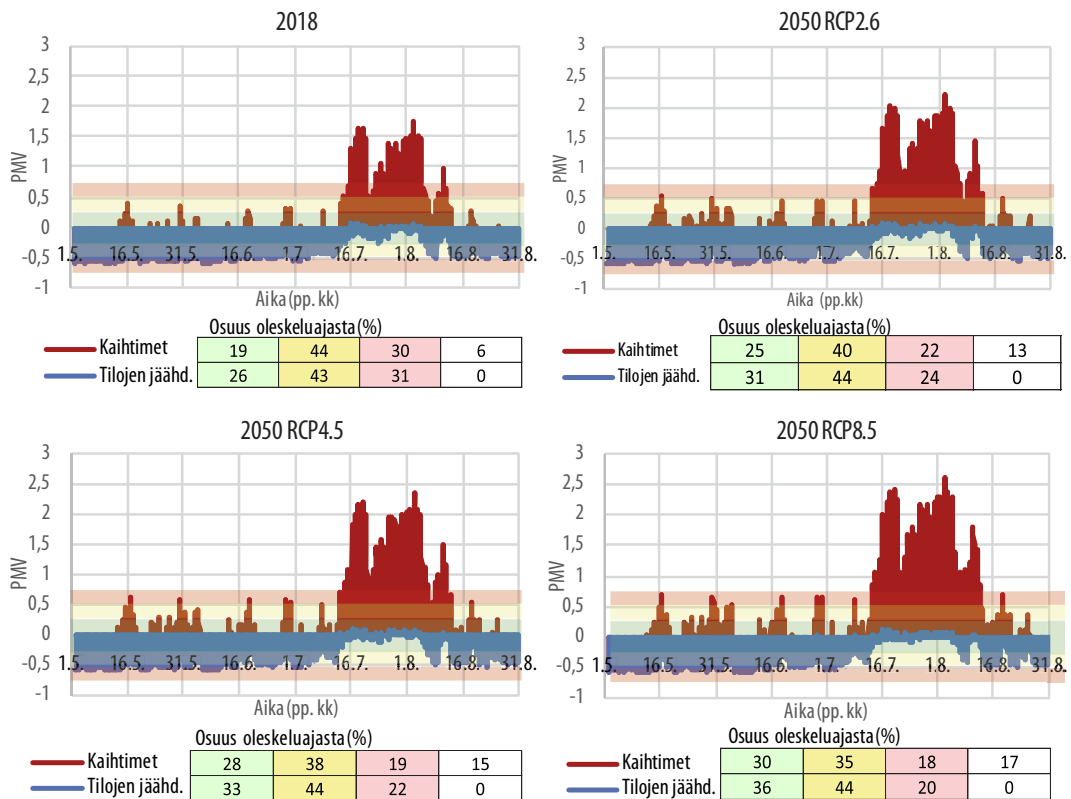
Pientalot

Kuvassa 5.22 on esillä 70-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa koettu lämpöviihtyvyys hellekesän 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaarioilla määritetyn 2050 ilmastoja kuvaavan hellekesän aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut tapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (kts taulukko 5.5).

Kuva 5.22 osoittaa, että ilman aktiivista tilojen jäähdytystä 60-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa PMV-indeksi on korkeimmillaan hieman alle 2 (ks. taulukko 2.1) kesän 2018 aikana. Kuva osoittaa, että koettu lämpöviihtyvyys on 19 % 2018 kesäkuukausien ajasta SFS-EN 16798-1 standardin laatuluokassa I, jota voidaan suositella iäkkäille ihmisille. Koettu lämpöviihtyvyys pysyy tällöin 93 % ajasta sisäympäristön laatuluokassa III, joka kuvaa kohtalaista sisäympäristön tasoa ja jota voidaan soveltaa olemassa oleville rakennuksille. Vuoteen 2050 mennessä lämpöviihtyvyys pysyy sisäympäristön laatuluokassa III 83–87 % kesäkuukausien ajasta riippuen päästöskenaariosta ja PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan yli 2 kaikilla päästöskenaarioilla.

Mikäli 60-luvun pientalo on varustettu aktiivisella tilojen jäähdytyksellä, lämpöviihtyvyys pysyy laatuluokassa I 26 % 2018 kesäkuukausien ajasta ja vuoteen 2050 mennessä siinä pysytään 31–36 % ajasta riippuen päästöskenaariosta. Lämpöviihtyvyys pystytään pitämään sekä 2018 että 2050 hellekesien aikana laatuluokassa III, jota voidaan soveltaa olemassa oleville rakennuksille.

Kuva 5.22. Henkilöiden kokema lämpöaistimus (PMV) 60-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa kesäkuukausien aikana (1.5.–31.8.) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Kuvassa PMV-indeksi saa arvon 0, jos koettu lämpöaistimus on neutraali tai makuuhuoneessa ei oleskella. Taustaväreillä kuvataan SFS-EN 16798-1 standardin suosittamia lämpöviihtyvyyden laatuluokkia: I (vihreä), II (keltainen), III (punainen) ja valkoinen taustaväri ei täytä I-III laatuluokkia.

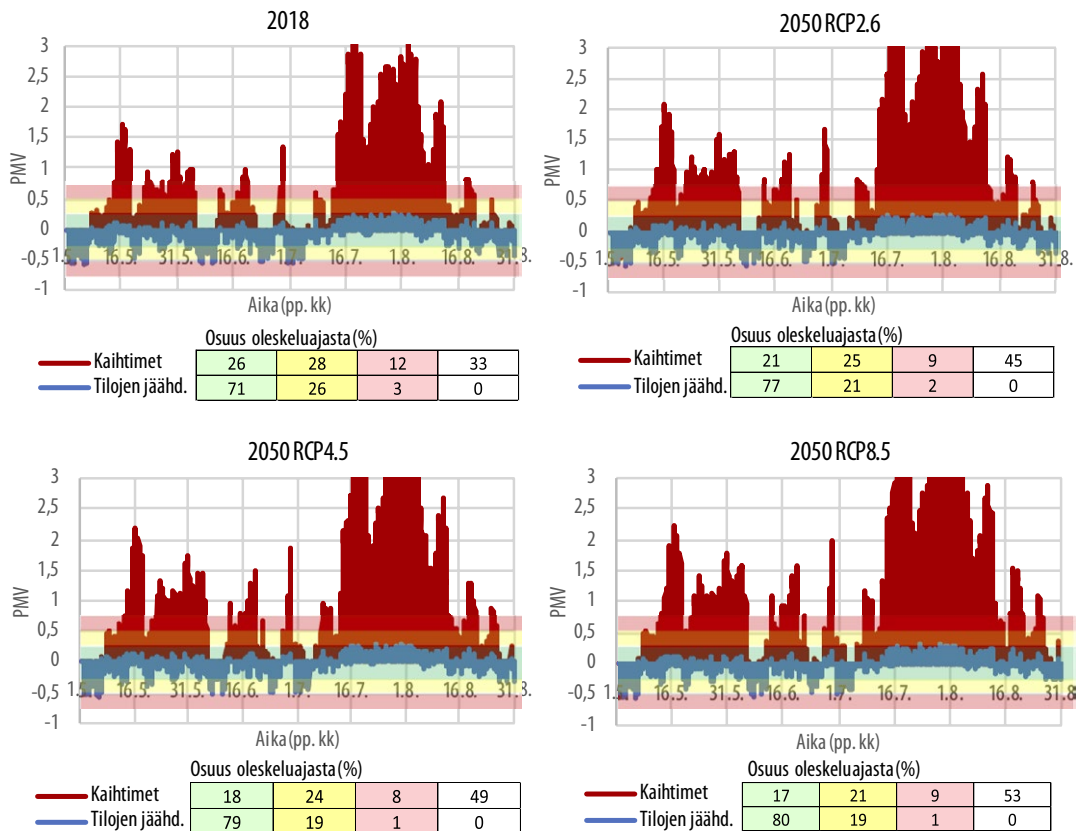


Kuvassa 5.23 on esillä uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa koettu lämpöviihtyvyys hellekesän 2018 sääolosuhteissa sekä kolmella eri päästöskenaariolla määritetyn 2050 ilmastoja kuvaavan hellekesän aikana. Kuvassa esitetään kaihtimilla varustetut tapaukset, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä, sekä tapaukset, joissa käytetään sekä kaihtimia että aktiivista tilojen jäähdytystä (ks. taulukko 5.6).

Kuva 5.23 osoittaa, että ilman aktiivista tilojen jäähdytystä uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan 3 (ks. taulukko 2.1) kesän 2018 aikana. Kuva osoittaa, että koettu lämpöviihtyvyys on vain 26 % 2018 kesäkuukausien ajasta SFS-EN 16798-1 standardin laatuluokassa I, jota voidaan suositella iäkkäille ihmisille. Koettu lämpöviihtyvyys pysyy tällöin 54 % ajasta sisäympäristön laatuluokassa II, joka kuvaa keskitasoisista sisäympäristön tasoa ja jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille. Vuoteen 2050 mennessä lämpöviihtyvyys pysyy sisäympäristön laatuluokassa II 38–46 % kesäkuukausien ajasta riippuen päästöskenaariosta ja PMV-indeksin arvo on korkeimmillaan 3 kaikilla päästöskenaariolla.

Mikäli uudispientalo on varustettu aktiivisella tilojen jäähdytyksellä, lämpöviihtyvyys pysyy laatuluokassa I 71 % 2018 kesäkuukausien ajasta ja vuoteen 2050 mennessä siinä pysytään 77–80 % ajasta riippuen päästökkenaariosta. Lämpöviihtyvyys pystytään pitämään sekä 2018 että 2050 hellekesien aikana laatuluokassa II 97–99 % ajasta, jota voidaan soveltaa uusille ja remontoituille rakennuksille.

Kuva 5.23. Henkilöiden kokema lämpöaistimus (PMV) uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa kesäkuukausien aikana (1.5.–31.8.) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Kuvassa PMV-indeksi saa arvon 0, jos koettu lämpöaistimus on neutraali tai makuuhuoneessa ei oleskella. Taustaväreillä kuvataan SFS-EN 16798-1 standardin suositamia lämpöviihtyvyyden laatuluokkia: I (vihreä), II (keltainen), III (punainen) ja valkoinen taustaväri ei täytä I-III laatuluokkia.



5.3.3 Energiankulutus

Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa vuoteen 2050 mennessä esimerkkirakennusten energiankulutukseen hellevuoden aikana mikäli kolme vaihtoehosta päästökkenaariota RCP2.6, RCP4.5 tai RCP8.5 toteutuvat. Energiankulutuksen vertailutasona käytetään hellevuoden 2018 toteutuneilla säätiedoilla simuloituja kulutuksia. Tässä

luvussa käytetään Ilmatieteen laitoksen RASMI-hankkeessa (Jylhä ym. 2020) määrittämiä sääaineistoja (ks. luku 2.3.1).

Vanhainkodit

Taulukossa 5.25 on 80-luvun vanhainkodin ja uudisvanhainkodin kaukolämmön ja sähkön kulutukset hellevuoden aikana nykyisessä ja vuoden 2050 ilmastossa kolmella eri päästöskenaariolla. Kaikissa taulukossa esitetyissä tapauksissa käytetään kaihtimia ja aktiivista tilojen jäähdytystä ja lisäksi uudisvanhainkodin tapauksissa käytetään myös ilmanvaihdon aktiivista jäähdytystä.

Taulukko 5.25 osoittaa, että 80-luvun vanhainkodissa jäähdytyksen sähkönkulutus kasvaa hellevuoden aikana vuoteen 2050 mennessä 32–59% päästöskenaariosta riippuen. Vaikka jäähdytyksen sähkönkulutuksen prosentuaalinen kasvu on varsin merkittävä, sen absoluuttinen kasvu vuoteen 2050 mennessä on vain 1,3–2,4 kWh/m²,a. Jäähdytys­sähkön osuus rakennuksen muusta sähkönkulutuksesta kasvaa hieman nykyisestä 7 %:n tasosta vuoteen 2050 mennessä, mikäli rakennuksen muussa sähkönkulutuksessa ei tapahdu muutoksia. Toisaalta ilmastomuutos vähentää kaukolämmönkulutusta 13–20 kWh/m²,a, eli 15–23 % vuoteen 2050 mennessä, joten rakennuksen kaukolämmön ja sähkön yhteenlaskettu ostoenergiankulutus tulee selvästi vähenemään ilmastomuutoksen seurauksena.

Taulukko 5.25. 80-luvun- sekä uudisvanhainkodin vuotuinen ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

		Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2018)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP2.6)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP4.5)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP8.5)
80-luvun vanhain- koti	Kaukolämpö (yht.)	89,6	76,6	73,4	69,3
	Sähkö (yht.) ^A	60,9	60,9	60,9	60,9
	Jäähdytys­sähkö	4,1	5,4	5,8	6,5
Jäähdytys­sähkön osuus (%)^B		6,7	8,9	9,5	10,7
Uudis- vanhain- koti	Kaukolämpö (yht.)	47,0	41,2	39,2	36,7
	Sähkö (yht.) ^A	55,4	55,4	55,4	55,4
	Jäähdytys­sähkö	2,9	3,8	4,2	4,8
Jäähdytys­sähkön osuus (%)^B		5,2	6,9	7,6	8,7

^A Jäähdytys­sähkön kulutus ei ole mukana.

^B Jäähdytys­sähkön osuus muusta sähkönkulutuksesta.

Vastaavasti uudisvanhainkodin jäähdetyksen sähkönkulutus kasvaa hellevuoden aikana vuoteen 2050 mennessä 31–66 % päästöskenaariosta riippuen, mutta sähkönkulutus kasvaa tällöin kuitenkin vain 0,9–1,9 kWh/m²,a. Uudisvanhainkodin kaukolämmönkulutus vähenee vuoteen 2050 mennessä 6–10 kWh/m²,a, joten kaukolämmön ja sähkön yhteenlaskettu ostoenergiankulutus tulee selvästi vähenemään ilmastonmuutoksen seurauksena myös uudisvanhainkodissa samoin kuin 80-luvun vanhainkodissa.

Tulokset osoittavat, että ilmastonmuutoksen absoluuttinen vaikutus jäähdetyssähkön kulutukseen (kWh/m²,a) on samaa suuruusluokkaa molemmissa vanhainkodeissa, mutta ilmastonmuutoksen absoluuttinen vaikutus kaukolämmönkulutukseen on noin kaksinkertainen 80-luvun vanhainkodissa, johtuen muun muassa uudisvanhainkotiä heikommasta lämmöneristystasosta.

Kerrostalot

Taulukossa 5.26 on 70-luvun kerrostalon ja uudiskerrostalon kaukolämmön ja sähkön kulutukset hellevuoden aikana nykyisessä ja vuoden 2050 ilmastossa kolmella eri päästöskenaariolla. Kaikissa taulukossa esitetyissä tapauksissa käytetään kaihtimia ja aktiivista tilojen jäähdetystä.

Taulukko 5.26 osoittaa, että 70-luvun kerrostalossa jäähdetyksen sähkönkulutus kasvaa hellevuoden aikana vuoteen 2050 mennessä 21–40 %, eli 0,9–1,7 kWh/m²,a päästöskenaariosta riippuen. Toisaalta ilmastonmuutos vähentää kaukolämmönkulutusta 11–18 kWh/m²,a, eli 8–13 % vuoteen 2050 mennessä. Vastaavasti uudiskerrostalon jäähdetyksen sähkönkulutus kasvaa hellevuoden aikana vuoteen 2050 mennessä 23–50 %, eli 0,6–1,3 kWh/m²,a päästöskenaariosta riippuen ja kaukolämmönkulutus vähenee vuoteen 2050 mennessä 6–10 kWh/m²,a. Tulokset osoittavat, että ilmastonmuutoksen absoluuttiset vaikutukset jäähdetyssähkön ja kaukolämmön kulutukseen ovat simuloituissa kerrostaloissa samaan suuruusluokkaa kuin vanhainkodeissa. Samoin kuin simuloituissa vanhainkodeissa (ks. taulukko 5.25), myös kerrostaloissa kaukolämmön ja sähkön yhteenlaskettu ostoenergiankulutus vähenee selvästi ilmastonmuutoksen seurauksena.

Taulukko 5.26. 70-luvun- sekä uudiskerrostalon vuotuinen ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa eri ratkaisuvaihtoehtoilla.

		Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2018)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP2.6)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP4.5)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP8.5)
70-luvun kerrostalo	Kaukolämpö (yht.)	139,0	128,3	125,1	121,0
	Sähkö (yht.) ^A	34,2	34,2	34,2	34,2
	Jäähdytys­sähkö	4,2	5,1	5,4	5,9
Jäähdytys­­sähkön osuus (%)^B		12,3	14,9	15,8	17,3
Uudis- kerrostalo	Kaukolämpö (yht.)	85,1	79,6	77,8	75,5
	Sähkö (yht.) ^A	35,8	35,8	35,8	35,8
	Jäähdytys­sähkö	2,6	3,2	3,5	3,9
Jäähdytys­­sähkön osuus (%)^B		7,3	8,9	9,8	10,9

^A Jäähdytys­­sähkön kulutus ei ole mukana.

^B Jäähdytys­­sähkön osuus muusta sähkö­­kulutuksesta.

Pientalot

Taulukossa 5.27 on 60-luvun pientalon ja uudispientalon sähkön kulutukset hellevuoden aikana nykyisessä ja vuoden 2050 ilmastossa kolmella eri päästöskenaariolla. Kaikissa taulukossa esitetyissä tapauksissa käytetään kaihtimia ja aktiivista tilojen jäähdytystä.

Taulukko 5.27 osoittaa, että 60-luvun pientalossa jäähdytyksen sähkö­­kulutus kasvaa hellevuoden aikana vuoteen 2050 mennessä 26–53 %, eli 1–2 kWh/m²,a päästöskenaariosta riippuen. Toisaalta ilmastonmuutos vähentää suoralla sähkö­­lämmityksellä varustetun pientalon lämmityssähkö­­kulutusta jopa 24–38 kWh/m²,a, joka vähentää sähkö­­kokonais­­kulutusta jäähdytys­­sähkö mukaan lukien 9–14 % vuoteen 2050 mennessä. Vastaavasti uudispientalon jäähdytyksen sähkö­­kulutus kasvaa hellevuoden aikana vuoteen 2050 mennessä 25–54 %, eli 0,7–1,5 kWh/m²,a päästöskenaariosta riippuen ja maalämpöpumpulla varustetun pientalon lämmityssähkö­­kulutus vähenee vuoteen 2050 mennessä 3–5 kWh/m²,a.

Tulokset osoittavat, että ilmastonmuutoksen absoluuttiset vaikutukset pientalojen jäähdytys­­sähkön kulutukseen ovat samaa suuruusluokkaa kuin muissakin simuloituissa rakennustyy­­peissä. Ilmastonmuutos vähentää lämmityksen ostoenergi­­ankulutusta 60-luvun pientalossa huomattavasti enemmän kuin muissa simuloituissa vanhaa rakennuskantaa

edustavissa esimerkkirakennuksissa, johtuen heikommasta lämmöneristystasosta. Lisäksi 60-luvun pientalossa vaipan pinta-alan suhde rakennuksen tilavuuteen on huomattavasti suurempi kuin vanhainkodissa ja kerrostalossa, joka osalta lisää vaipan lämmöneristystason vaikutusta lämmitysenergiankulutukseen. Maalämpöpumpulla varustetussa uudispientalossa ilmastonmuutoksen absoluuttinen vaikutus lämmityksen ostoenergiankulutukseen on huomattavasti pienempi kuin muissa simuloituissa rakennustyypeissä, mutta uudispientalossakin sähkön kokonaiskulutus jäähdytys­sähkö mukaan lukien vähenee ilmastonmuutoksen seurauksena vuoteen 2050 mennessä.

Taulukko 5.27. 60-luvun- sekä uudispientalon vuotuinen ostoenergiankulutus (kWh/m²,a) nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

		Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2018)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP2.6)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP4.5)	Kaihtimet + tilojen jäähdytys (2050 RCP8.5)
60-luvun pientalo	Sähkö (yht.) ^A	250,2	226,0	220,0	211,9
	Jäähdytys­­sähkö	3,8	4,8	5,2	5,8
	Jäähdytys­­sähkön osuus (%)^B	1,5	2,1	2,4	2,7
Uudis- pientalo	Sähkö (yht.) ^A	71,4	68,4	67,5	66,2
	Jäähdytys­­sähkö	2,8	3,5	3,8	4,3
	Jäähdytys­­sähkön osuus (%)^B	3,9	5,1	5,6	6,5

^A Jäähdytys­­sähkön kulutus ei ole mukana.

^B Jäähdytys­­sähkön osuus muusta sähkö­­kulutuksesta.

5.4 Jäähdytettyjen rakennusten osuus Suomessa

5.4.1 Kaukojäähdytys

Taulukossa 5.28 on esillä Energiateollisuus ry:n vuonna 2022 julkaisemat kaukojäähdytys­­n käyttötilatot eri paikkakunnilta Suomessa (Energiateollisuus ry 2022). Tilaston mukaan Suomessa käytettiin kaukojäähdytystä vuonna 2021 kymmenellä eri paikkakunnalla, joista seitsemän Lempäälää, Mikkeliä ja Lahtea lukuun ottamatta, kuuluvat asukasluvultaan kymmenen suurimman kaupungin joukkoon. Tilasto osoittaa, että Helsingin ja Turun yhteenlaskettu kaukojäähdytys­­n sopimusteho on lähes 80 % koko Suomen kaukojäähdytys­­n kapasiteetista. Kaukojäähdytettyjä rakennuksia oli Suomessa vuonna 2021 vain 866, joka on 0,06 % Suomen kaikista rakennuksista (Tilastokeskus 2022). Tilaston

perusteella voidaan laskea, että kaukojäähdytetyn rakennuksen keskimääräinen tilavuus vaihtelee paikkakunnittain noin 15 000 ja 570 000 m³ välillä ja kaukojäähdytetyn rakennuksen keskimääräinen tilavuus on noin 130 000 m³. Tulos osoittaa, että kaukojäähdytetyt rakennukset ovat pääosin erittäin suuria. Vaikka kaukojäähdytysverkkoon kytkettyjen rakennusten tyyppiä ei ole tilastoitu Suomessa, ovat kaukojäähdytetyt rakennukset tyypillisesti muita kuin asuinrakennuksia, esimerkiksi suuria liikerakennuksia, toimistoja tai palvelurakennuksia. Vuonna 2021 tehdyn kyselytutkimuksen mukaan kaukojäähdytystä myytiin vuonna 2020 asuinrakennuksiin Helsingissä, Turussa, Espoossa, Tampereella, Kuopiossa ja Porissa yritysten oman arvion mukaan noin 15,6 GWh, joka on noin 5 % vuonna 2020 käytetystä kaukojäähdytysenergiasta (Koskinen 2021).

Taulukko 5.28. Kaukojäähdytyksen käyttö vuonna 2021 eri paikkakunnilla (Energiateollisuus ry 2022).

Paikkakunta	Sopimusteho, MW	Käytetty jäähdytysenergia, GWh	Verkoston pituus, km	Rakennusten lukumäärä	Rakennusten tilavuus, 10 ³ ×m ³
Helsinki	283,3	200,0	92,8	593	28416
Turku	69,8	44,8	29,9	128	5899
Espoo	33,36	36,9	21,6	32	-
Tampere	33,1	36,0	18,4	61	34778
Kuopio	11,2	4,2	4,0	10	753
Jyväskylä	6,3	6,1	1,3	4	650
Pori	4,9	4,4	3,9	26	393
Lempäälä	2,0	2,5	0,4	6	169
Mikkeli	1,5	1,1	1,6	5	-
Lahti	0,6	0,2	1,2	1	90
YHTEENSÄ	446	336	175	866	71148

5.4.2 Ilmalämpöpumput

Suomen lämpöpumppuyhdistys SULPU ry on tilastoinut Suomessa myydyt kiinteästi asennettavat lämpöpumput vuodesta 1976 lähtien ja tilaston mukaan Suomessa on vuoden 2022 syyskuun loppuun mennessä myyty lähes 1,1 miljoonaa ilmalämpöpumppua (SULPU ry 2022). Suurinta osaa myydyistä ilmalämpöpumpuista voidaan käyttää sekä lämmitykseen että jäähdytykseen, mutta kaikkia ilmalämpöpumppuja voidaan käyttää jäähdytykseen. Ilmalämpöpumppujen asennuskohteita ei tilastoida Suomessa, joten

ilmalämpöpumppujen asennusmääristä eri rakennustyypeissä ei ole tarkkaa tietoa. Ilmalämpöpumppujen asennusmääriä eri rakennustyypeissä voidaan arvioida VTT:n tekemän skenaarion avulla eri asuinrakennustyypeihin asennetuista ilmalämpöpumpuista Suomessa vuonna 2020 (Laitinen ym. 2014) täydennettynä SULPU ry:n tilastotiedolla ilmalämpöpumppujen myyntimääristä sekä SULPU ry:n arviolla kerrostaloihin asennettujen jäähdyttävien ilmalämpöpumppujen määrästä. SULPU ry:n toiminnanjohtajan Jussi Hirvosen arvion mukaan suomalaisiin kerrostaloasuntoihin on vuoden 2022 syksyyn mennessä asennettu noin 60 000–70 000 jäähdyttävää ilmalämpöpumppua. Tässä raportissa kerrostaloasuntoihin asennettujen ilmalämpöpumppujen määränä käytetään Jussi Hirvosen esittämän arvion keskiarvoa, eli 65 000 kpl.

Taulukossa 5.29 on edellä mainittuihin lähteisiin perustuva arvio eri rakennustyypeihin asennetuista ilmalämpöpumpuista ja ilmalämpöpumpuilla varustettujen rakennusten tai asuntojen osuudesta Suomen rakennuskannassa. Rakennusten ja asuntojen osuuksien laskentaan käytettiin Tilastokeskuksen tilastotietoja eri rakennustyyppien ja asuntojen lukumääristä Suomessa (Tilastokeskus 2022). Taulukon 5.29 arvioiden mukaan noin 70% Suomen pientaloista ja noin 30 % rivitaloasunnoista on varustettu ilmalämpöpumpulla. Taulukon arvion mukaan vain 4 % noin 1,5 miljoonasta suomalaisesta kerrostaloasunnosta on varustettu jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla, joten yllämenemisriski on asuinrakennusten osalta vakavin asuinkerrostaloissa. Tässä yhteydessä on kuitenkin syytä korostaa, että taulukossa 5.29 esitetty arvio pientaloihin, rivitaloihin ja vapaa-ajan asuntoihin asennetuista ilmalämpöpumpuista hiukan yliarvioi lämpöpumppujen asennusmääriä, koska VTT:n skenario (Laitinen ym. 2014) ei ota huomioon muihin kuin asuinrakennuksiin asennettuja ilmalämpöpumppuja.

Taulukko 5.29. Arvio Suomeen asennettujen ilmalämpöpumppujen määrästä eri asuinrakennustyypeissä ja ilmalämpöpumpulla varustettujen rakennusten tai asuntojen osuudesta Suomen rakennuskannassa.

Rakennustyyppi	Rakennusten lukumäärä	Asuntojen lukumäärä	Rakennuksia, %	Asuntoja, %
Pientalo	822461	-	70	-
Rivitalo	-	131594	-	31
Asuinkerrostalo	-	65000	-	4
Vapaa-ajan asunnot	66594	-	13	-

Suomessa on myyty noin 172 000 maalämpöpumppua ja noin 53 000 ilma-vesilämpöpumppua vuoden 2021 loppuun mennessä (SULPU ry 2022). Maalämpöpumpun maapiiriä on mahdollista käyttää rakennuksen vapaajäähdytykseen kesällä, mikäli rakennuksen talotekniset järjestelmät mahdollistavat sen. Mutta, maalämpöjärjestelmän vapaajäähdytyksen käytön yleisyydestä Suomessa ei ole kuitenkaan tilastoitua tietoa tai arvioita. Myös osa Suomessa lämmityskäyttöön myydyistä ilma-vesilämpöpumpuista soveltuisivat rakennusten aktiiviseen jäähdytykseen kesällä, mutta niiden käyttö jäähdytystarkoitukseen on ainakin toistaiseksi harvinaista Suomessa.

Suomessa myytyjä liikuteltavien huonejäähdytyslaitteiden myyntimääriä ei ole tilastoitu. Vaikka niillä ei tyypillisesti voida hallita huonetilojen lämpöoloja yhtä tehokkaasti vaivattomasti kuin kiinteästi asennettavilla jäähdytyslaitteilla, ne tarjoavat kuitenkin yhden mahdollisuuden vähentää yksittäisten tilojen ylläpölyä, mikäli lauhdelämmön ja kondenssiveden poisto pystytään hoitamaan asianmukaisesti.

5.4.3 Jäähdytyksen käyttö sairaaloissa

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos toteutti loppuvuodesta 2021 laajan kyselytutkimuksen helteen vaikutuksista ja varautumisesta perusterveydenhuollon ja erikoissairaanhoidon sairaaloissa Suomessa. Tutkimukseen osallistui 97 perusterveydenhuollon ja 43 erikoissairaanhoidon sairaalaa eri puolilta Suomea. Kyselytutkimuksessa havaittiin, että sisätilojen kuumentuminen helteellä on perusterveydenhuollon ja erikoissairaanhoidon sairaaloissa yleinen ongelma, joka vaikuttaa potilaiden ja työntekijöiden hyvinvointiin sekä hoitolaistosten toimintaan. (Kollanus ym. 2022)

Tutkimuksessa havaittiin, että koneellisen jäähdytyksen käytössä on paljon vaihtelua sairaaloiden ja niiden erityyppisten tilojen välillä. Yleisimmin jäähdytyksessä on puutteita henkilökunnan taukutiloissa, vuodeosastojen potilashuoneissa sekä hoitotoimenpide- ja tutkimushuoneissa (pois lukien leikkaus- ja synnytyssalit). Tulosten perusteella suurimmassa osassa sairaaloita (92 %) voidaan jäähdyttää ainakin joitakin tiloja. Kuitenkin vain esimerkiksi 41 % synnyttäjien ja 43 % muiden vuodeosastojen potilashuoneista sekä 57 % teho-osastoista oli kyselyyn vastanneissa toimipaikoissa kaikilta osin jäähdytettyjä. Keskimääräisesti tarkasteltuna koneellinen jäähdytys on yleisimmin käytössä leikkaussaleissa ja lääkkeiden säilytykseen tarkoitetuissa tiloissa, joita jäähdytetään kaikilta osin 66 % ja 70 % kyselyyn osallistuneista sairaaloista. (Kollanus ym. 2022)

Tutkimuksessa kartoitettiin myös sairaaloiden jäähdytyksessä käytettäviä teknisiä ratkaisuja. Kaikista kyselyyn osallistuneista sairaaloista 72 % oli varustettu ilmanvaihdon koneellisella jäähdytyksellä. Lisäksi 47 % sairaaloista ilmoitti hyödyntävänsä jäähdytyksessä ilmalämpöpumppuja ja samoin 47 % siirrettäviä ilmastointilaitteita. (Kollanus ym. 2022).

6 Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat

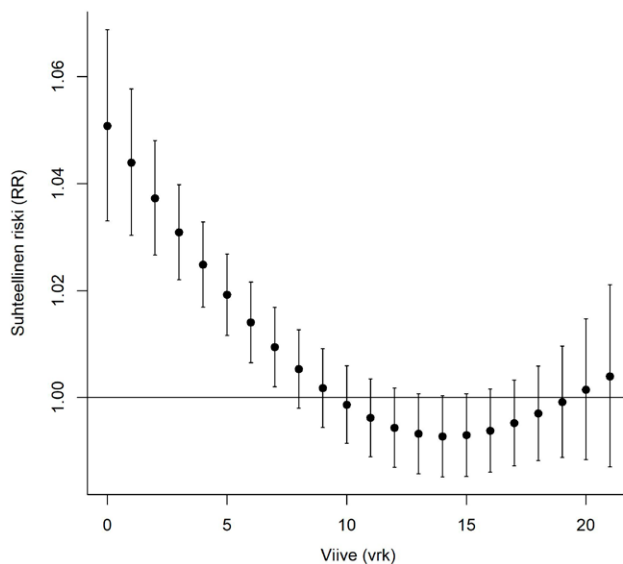
6.1 Korkeiden ulkolämpötilojen aiheuttaman terveysriskin suuruus

6.1.1 Altiste-vastesuhteet

Kuolleisuus

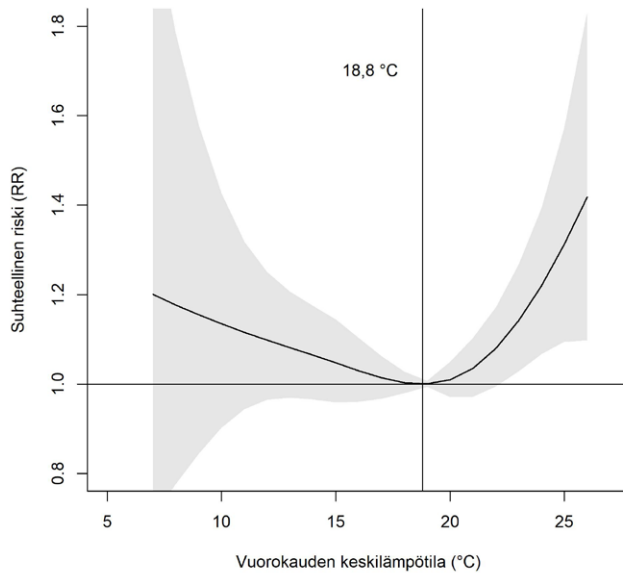
Helleaaltopäivät olivat tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä kohonneeseen kuolleisuuteen yli 65-vuotiailla Uudellamaalla (kuva 6.1). Helleaaltopäivinä (viive 0) kuolleisuus oli yli 5 % tavanomaista korkeampi, ja kuolleisuus säilyi korkeana noin viikon ajan (viiveet 1–7). Tämän jälkeen päivittäinen kuolleisuus oli hieman tavanomaista matalampi (viiveet 11–17), joskaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä.

Kuva 6.1. Helleaaltopäivien yhteys päivittäiseen kuolleisuuteen yli 65-vuotiailla.



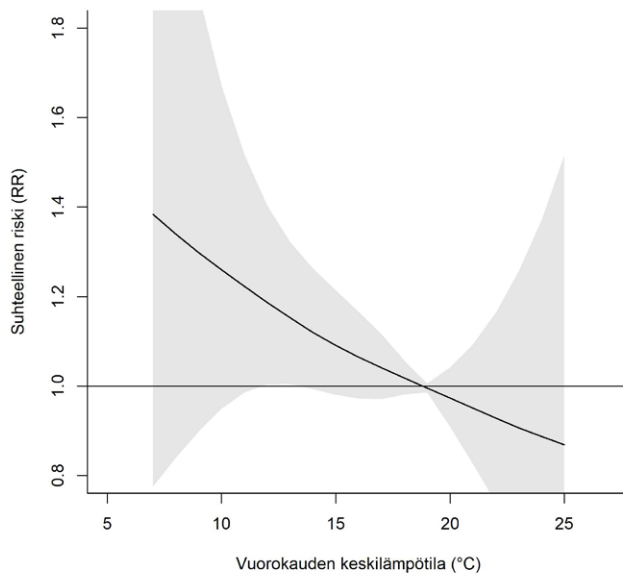
Myös päivittäisen lämpötilan havaittiin olevan selkeästi yhteydessä yli 65-vuotiaiden kuolleisuuteen (kuva 6.2). Päivittäinen kuolleisuus oli kesäaikana alhaisimmillaan 18,8 asteessa, ja kuumina päivinä kuolleisuus oli tilastollisesti merkitsevästi tätä korkeampi.

Kuva 6.2. Päivittäisen lämpötilan yhteys päivittäiseen kuolleisuuteen yli 65-vuotiailla. Kuvaan merkitty lämpötila, jossa päivittäinen kuolleisuus on pienin kesäaikana.



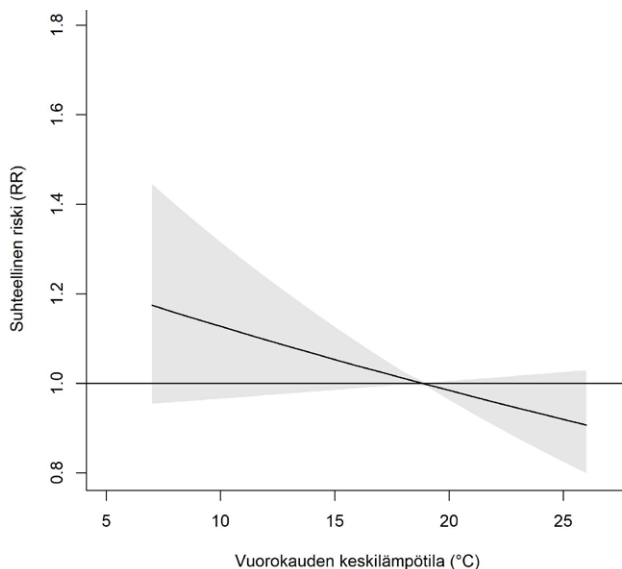
Kun aineistosta poistettiin pitkittyneen helteen, eli helleaallon, aikaiset päivät helleaallon kolmannesta päivästä alkaen, eivät korkeat päivittäiset lämpötilat enää olleet yhteydessä kuolleisuuteen (kuva 6.3). Tämä viittaa siihen, että suurin osa korkeiden lämpötilojen kuolleisuusvaikutuksesta aiheutuu Suomessa pitkittyneestä lämpöstressistä helleaaltojen aikana, ei yksittäisistä kuumista päivistä.

Kuva 6.3. Päivittäisen lämpötilan yhteys kuolleisuuteen yli 65-vuotiailla. Aineistosta poistettu helleaaltopäivät.



Korkeat päivittäiset lämpötilat eivät olleet yhteydessä kohonneeseen kuolleisuuteen alle 65-vuotiailla, vaan kuolleisuus oli ennemmin tavanomaista matalampaa kuumina päivinä (kuva 6.4). Tämän perusteella helteen terveystahittoja arvioitaessa riittää yli 65-vuotiaitten tarkastelu.

Kuva 6.4. Päivittäisen lämpötilan yhteys päivittäiseen kuolleisuuteen alle 65-vuotiailla.

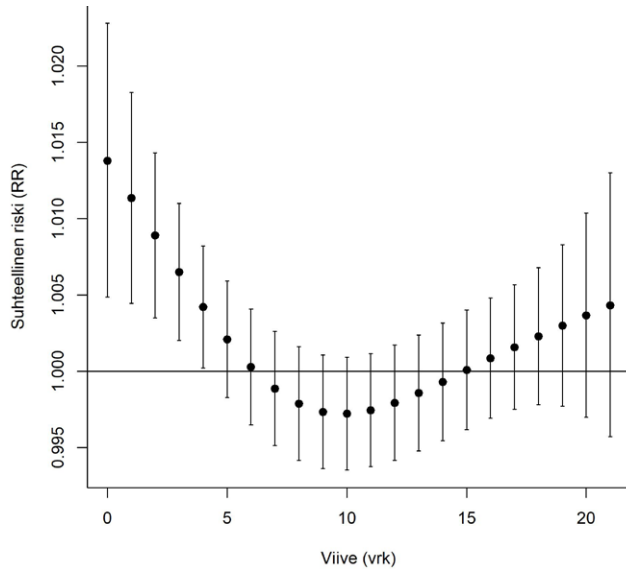


Kun huomioitiin sekä kohonneen että alentuneen kuolleisuudet päivät 21 päivän ajalta (eli laskettiin helleaaltopäivän nettovaikutus väestössä), arvioitiin helleaaltopäivän lisäävän kuolleisuutta yli 65-vuotiailla 21,2 % (arvion alaraja 9,7 % – yläaraja 33,8 %) ja yli 75-vuotiailla 26,8 % (12,9–42,4 %). Yli 75-vuotiaat olivat siis haitoille kaikkein herkimpiä, mutta ero altiste-vastesuhteessa ei ollut suuri. Paras arvio helteen aiheuttamista kuolemista saadaan siten käyttämällä alhaisempaa ikärajaa, jonka myötä riskiryhmän koko kasvaa huomattavasti. Koko väestössä kuolleisuus kasvoi helleaaltopäivinä 14,1 % (4,5–24,5 %). Arvio oli selvästi vanhempia ikäluokkia pienempi, koska alle 65-vuotiaissa helle ei ollut yhteydessä lisääntyneeseen kuolleisuuteen.

Sairaalakäynnit

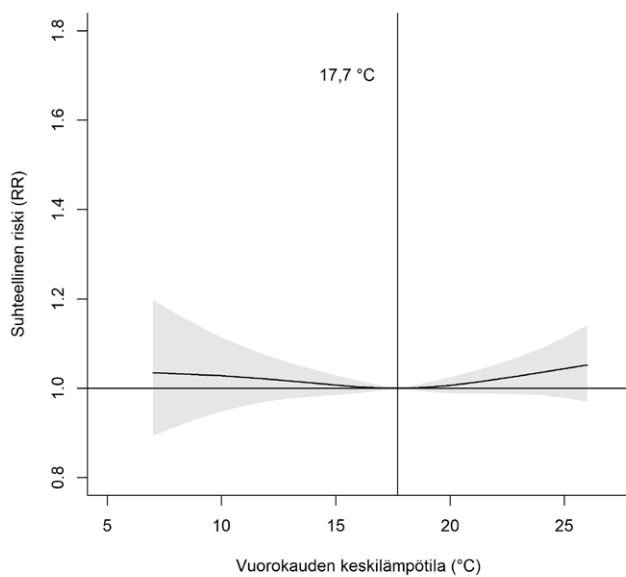
Helleaaltopäivät olivat tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä kohonneeseen sairaalakäyntien määrään yli 65-vuotiailla Uudellamaalla (kuva 6.5). Helleaaltopäivinä (viive 0) sairaalaan joutui noin 1,4 % tavanomaista enemmän yli 65-vuotiaita, ja vaikutus näkyi useamman päivän ajan (viiveet 1–4). Tämän jälkeen päivittäinen kuolleisuus vaikutti olevan tavanomaista matalampaa noin seitsemän päivän ajan (viiveet 8–14), joskaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä.

Kuva 6.5. Helleaaltopäivien yhteys päivittäisten sairaalakäyntien lukumäärään.



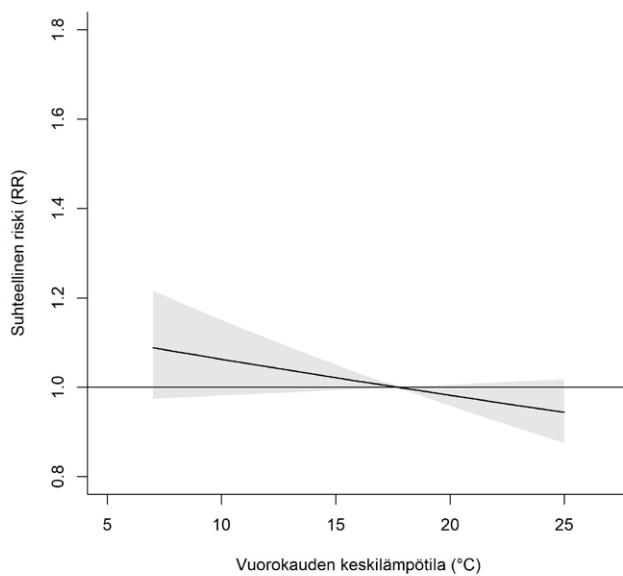
Päivittäinen lämpötila ei ollut tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä yli 65-vuotiaiden sairaalakäyntien lukumäärään (kuva 6.6). Sairaalakäyntien lukumäärä oli joka tapauksessa kesäaikana pienimmillään, kun lämpötila oli 17,7 °C, ja korkeissa lämpötiloissa käyntejä vaikutti olevan enemmän.

Kuva 6.6. Päivittäisen lämpötilan yhteys päivittäiseen sairaalakäyntien lukumäärään yli 65-vuotiailla. Kuvaan merkitty lämpötila, jossa päivittäisten sairaalakäyntien määrä on pienin kesäaikana.

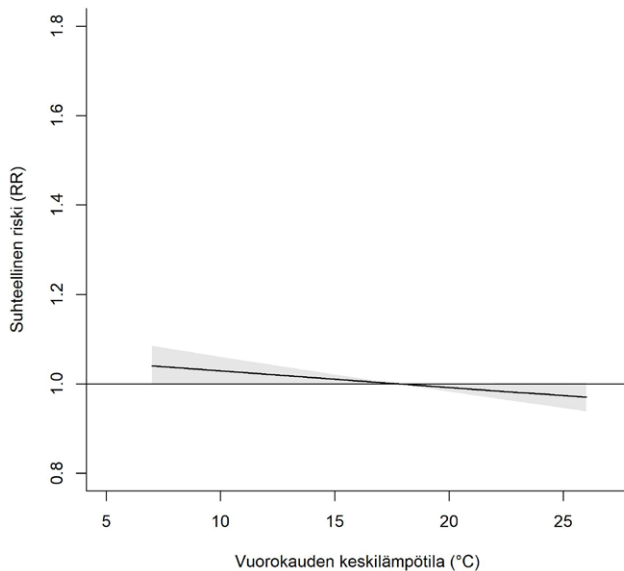


Kun aineistosta poistettiin pitkittyneen helteen, eli helleaallon, aikaiset päivät helleaallon kolmannelta päivästä alkaen, ei korkeiden lämpötilojen havaittu lisäävän vaan ennemmin vähentävän päivittäistä sairaalakäyntien määrää (kuva 6.7). Tämän perusteella sairaalakäyntejä lisää Suomessa pitkittynyt lämpöstressi helleaaltojen aikana, eivät yksittäiset kuumat päivät.

Kuva 6.7. Päivittäisen lämpötilan yhteys päivittäisten sairaalakäyntien lukumäärään yli 65-vuotiailla. Aineistosta poistettu helleaalto päivät.



Alle 65-vuotiailla korkeat kesäajan lämpötilat olivat yhteydessä tavanomaista alhaisempaan sairaalakäyntien päivittäiseen lukumäärään (kuva 6.8). Tämän perusteella helteen terveyshaittoja arvioitaessa riittää yli 65-vuotiaitten tarkastelu.

Kuva 6.8. Päivittäisen lämpötilan yhteys päivittäiseen sairaalakäyntien lukumäärään alle 65-vuotiailla.

Kun huomioitiin kaikki helleaaltopäivään liittyvät viivästyneet vaikutukset 21 päivän ajalta (eli laskettiin helleaaltopäivän nettovaikutus), arvioitiin helleaaltopäivän lisäävän sairaalakäyntejä yli 65-vuotiailla 4,8 % (arvion alaraja -0,3 % – yläraja 10,2 %) ja yli 75-vuotiailla 3,1 % (-2,9–9,4 %). Tämä viittaa siihen, että yli 65-vuotiaat voivat olla jopa herkempiä helteen kuolemaa lievemmillä haitoille, joskin ero oli pieni. Paras arvio helteen aiheuttamista kuolemista väestötasolla saadaan siten käyttämällä alhaisempaa ikärajaa, jonka myötä samalla riskiryhmän koko kasvaa huomattavasti. Koko väestössä sairaalakäyntien lukumäärän ei havaittu olevan yhteydessä helleaaltopäiviin. Tämä johtuu siitä, että alle 65-vuotiaiden sairaalakäyntien negatiivinen yhteys helleaaltopäiviin kumooa yli 65-vuotiailla havaittua positiivista yhteyttä.

6.1.2 Vaikutusarviointi

Nykytilanne

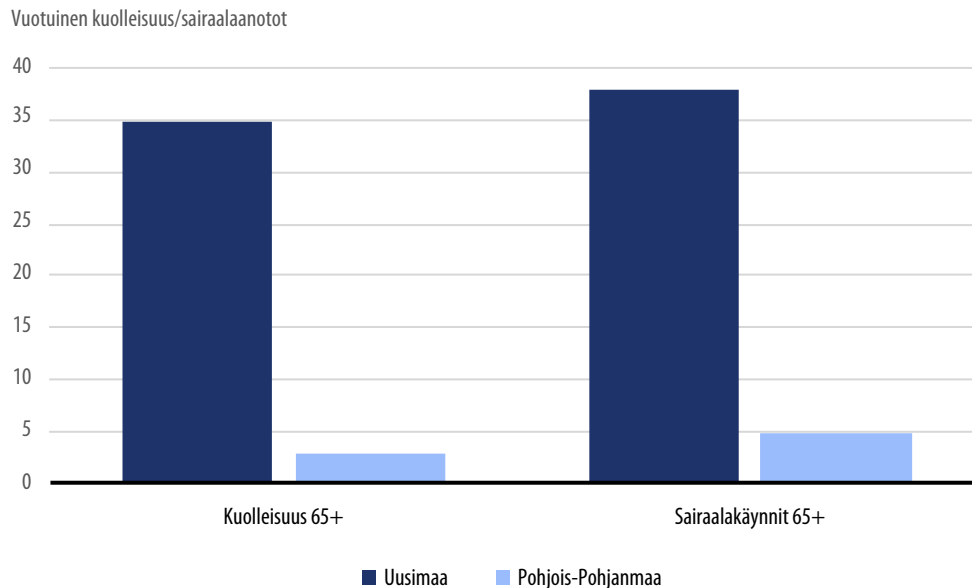
Vaikutusarvioinneissa pääpaino oli helleaaltojen vaikutusten laskennassa, koska altiste-vastesuhdetarkastelujen perusteella kansanterveydellisesti merkittävät vakavat haittavaikutukset aiheutuvat lähinnä pitkittyneestä kuumuudesta, eivät yksittäisistä kuumista päivistä. Nykyilmastolle vaikutukset laskettiin kuitenkin myös vuorokausilämpötilalle. On huomattava, että näitä vaikutuksia ei voi suoraan verrata helleaaltojen vaikutuksiin matalamman vertailulämpötilan vuoksi (minimikuolleisuuden/sairaalakäyntien määrän lämpötila vs. 90. prosenttipiste). Vuorokausilämpötilaa käytettäessä vaikutusarvioinnin voidaan

katsoa kuvaavan kaikkien lämpimien päivien kokonaisvaikutusta ilman pitkittyneistä lämpimistä jaksoista aiheutuvaa lisätaakkaa.

Arvio helleaaltojen haitoista nykyilmastossa perustuu 1999–2018 havaittuihin lämpötiloihin. Helteen (helleaaltopäivän) kynnyslämpötilana käytettiin Uudenmaan lämpötilajakauman 90. prosenttipistettä eli 20,8 °C, koska myös epidemiologiset tulokset tuotettiin käyttäen Uudenmaan lämpötila-aineistoa. Samaa arvoa käytettiin Pohjois-Pohjanmaalle, koska pidettiin todennäköisenä, että korkeiden lämpötilojen haitat alkavat suurin piirtein samassa lämpötilassa (eikä kynnyslämpötilasta Pohjois-Pohjanmaalla ollut tutkimustietoa).

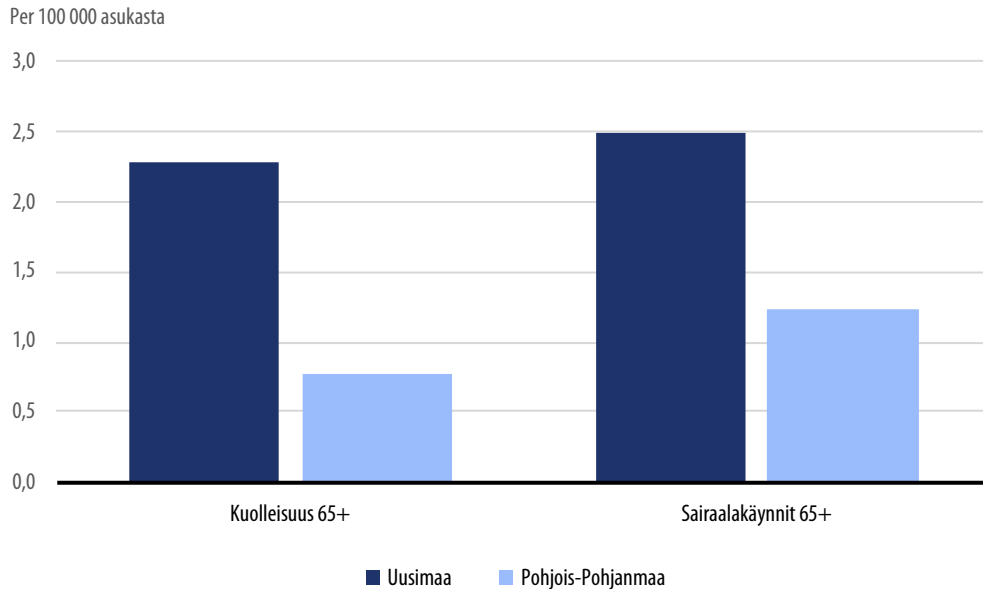
Väestötasolla helleaaltojen vaikutus kuolleisuuteen oli hieman pienempi kuin sairaalakäyntien lukumäärään yli 65-vuotiailla niin Uudellamaalla kuin Pohjois-Pohjanmaallakin (kuva 6.9). Helteestä aiheutuvat haitat olivat huomattavasti suuremmat Uudellamaalla jo pelkästään suuremman väestön vuoksi.

Kuva 6.9. Helleaaltojen vaikutus kuolleisuuteen ja sairaalakäynteihin yli 65-vuotiailla. Tapausten määrä keskimäärin vuosittain (1999–2018).



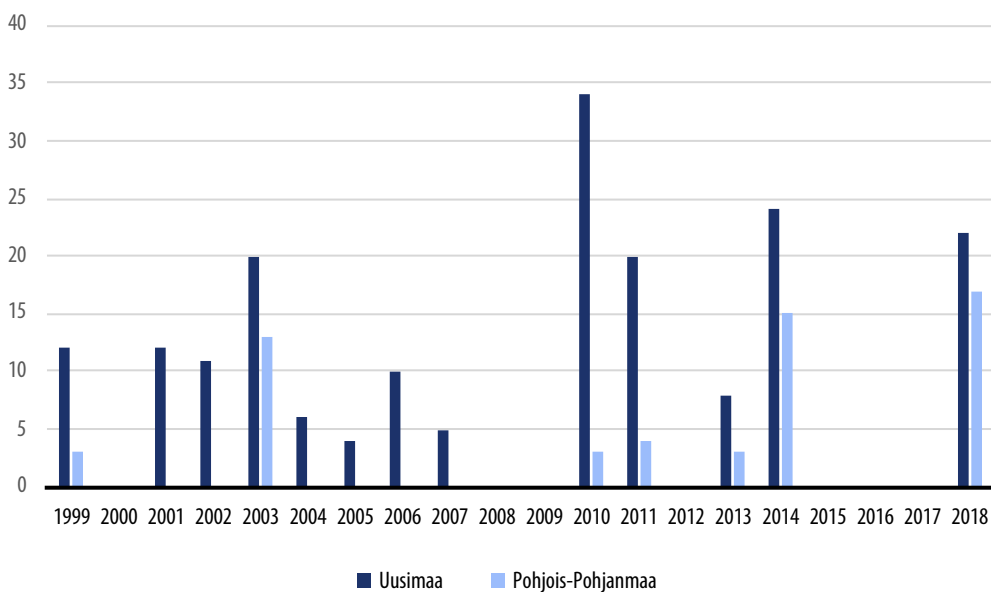
Tarkasteltaessa helleaaltojen vaikutuksia siten, että huomioitiin erot maakuntien välillä väestömäärässä, voitiin edelleen todeta helteeseen liittyviä kuolemia sekä sairaalakäyntejä tapahtuneen enemmän Uudenmaan alueella. (kuva 6.10).

Kuva 6.10. Helleaaltojen vaikutus kuolleisuuteen ja sairaalakäynteihin yli 65-vuotiailla per 100 000 asukasta. Tapausten määrä keskimäärin vuosittain (1999–2018).



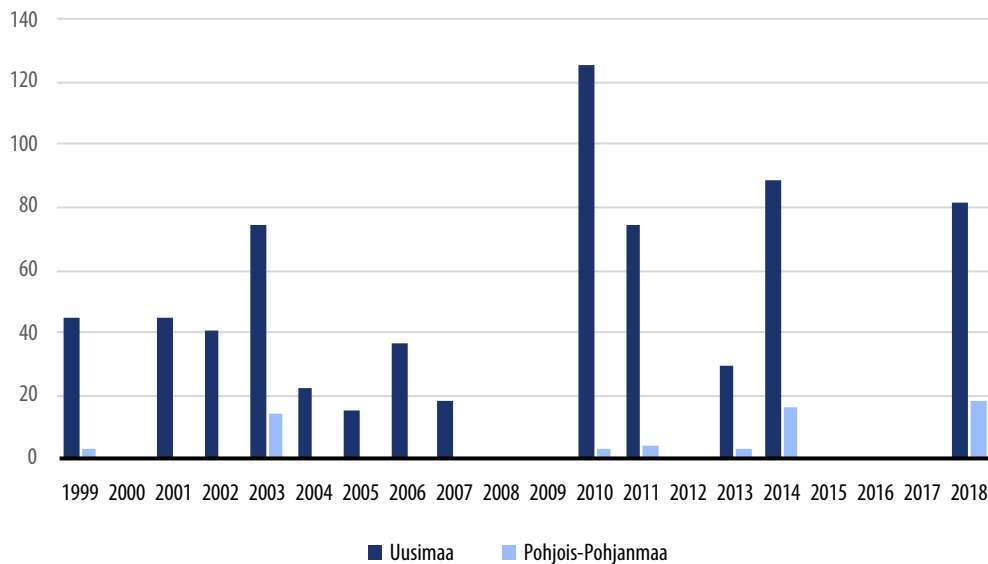
Tärkeimpänä syynä Uudenmaan suurempiin helleaalloista aiheutuneisiin haittoihin on yksinkertaisesti helleaaltopäivien suurempi lukumäärä. Helleaaltopäiviä oli Uudellamaalla vuosittain keskimäärin 9,4 ja Pohjois-Pohjanmaalla 2,9. Helleaaltopäivien lukumäärässä oli kuitenkin suurta vaihtelua vuosien välillä (kuva 6.11).

Kuva 6.11 Helleaaltopäivien määrä vuosina 1999–2018.



Helleaaltoihin liittyvien kuolemien määrässä oli vastaavalla tavalla suurta vaihtelua vuosien välillä (kuva 6.12.) Erityisen paljon kuolemia oli vuosina 2003, 2010, 2014 ja 2018. Vuosikohtaiset kuolleisuusarviot eivät kuitenkaan anna täysin realistista kuvaa eri kesien vaikutuksista, koska pohjana laskennoissa oli kaikille vuosille vuoden 2009 väestö. Väestön ikääntymisestä johtuen laskentatapa siis hieman yliarvioi kuolleisuutta aikaisempina vuosina ja aliarvioi kuolleisuutta myöhempinä vuosina.

Kuva 6.12. Helleaaltoihin liittyvien kuolemien lukumäärä eri vuosina.



Uudellamaalla oli vuosittain keskimäärin 35 helleaaltoihin yhdistyvää kuolemaa ja Pohjois-Pohjanmaalla 3 (taulukko 6.1). Vastaavat lukumäärät sairaalakäynneille olivat 38 ja 5. Vaikutukset olivat samaa suuruusluokkaa, kun laskennoissa käytettiin päivittäistä lämpötilaa (helleaaltopäivän sijaan).

Taulukko 6.1. Helleaaltopäivien ja korkeiden päivittäisten lämpötilojen keskimääräinen vuosittainen vaikutus kuolleisuuteen ja sairaalakäynteihin yli 65-vuotiailla vuosina 1999–2018.

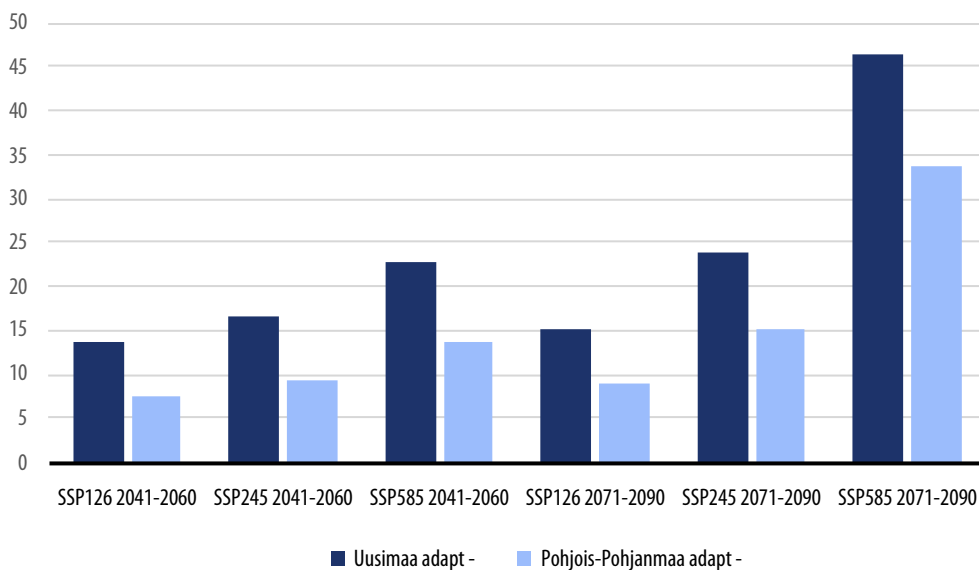
	Uusimaa	Pohjois-Pohjanmaa
Helleaallot		
Kuolleisuus	35	3,0
Sairaalakäynnit	38	4,8
Kuolleisuus/100000	2,3	0,8
Sairaalakäynnit/100000	2,5	1,2
Korkeat päivittäiset lämpötilat		
Kuolleisuus	32	4,3
Sairaalakäynnit	33	6,9
Kuolleisuus/100000	2,1	1,1
Sairaalakäynnit/100000	2,5	1,2

Tulevaisuus

Helleaaltojen vaikutuksia tulevaisuuden ilmastossa arvioitaessa käytettiin 25 ilmastomallin tuottamia simuloituja lämpötiloja sekä arvioita tulevaisuuden väestöstä (taulukko 2.2) ja taustariskeistä (taulukko 2.3). Laskennoissa käytettiin helleaallon kynnyslämpötilana samaa arvoa kuin nykytilanteessa (20,8 °C). Tämä kuvaa tilannetta, jossa sopeutumista tulevaisuuden kohoaviin lämpötiloihin ei tapahdu lainkaan. Kyse on siis "worst-case" tilanteesta, joka on hyvin epätodennäköinen. Luotettavaa määrällistä arviota siitä, kuinka paljon sopeutumista tulee tapahtumaan, ei kuitenkaan pystytä antamaan.

Helleaaltopäiviä arvioitiin keskiskenaarion (SSP2-4.5) perusteella olevan Uudellamaalla vuonna 2050 noin 16 ja vuonna 2080 noin 24 (kuva 6.13). Kasvua nykytilanteeseen oli siten vuonna 2050 75 % ja vuonna 2080 peräti 250 %.

Kuva 6.13. Helleaaltopäivien lukumäärä tulevaisuudessa, kun hellepäivän kynnyslämpötilana käytetään nykytilanteeseen perustuva lämpötila-arvoa 20,8 °C (oletuksena että adaptaatiota ei tapahdu väestössä).



Taulukossa 6.2 on koottuna vaikutusarviointien tulokset SSP-skenaarioittain vuosille 2050 ja 2080. Vaikutukset tulevaisuudessa on laskettu käyttäen sekä nykyväestöä, että arviota tulevaisuuden väestön määrästä ja ikärakenteesta. Verrattuna nykytilanteeseen (taulukko 6.1) haittojen määrän arvioidaan keskiskenaariossa kaksinkertaistuvan jo pelkästään lämpötilan nousun vuoksi vuoteen 2050 mennessä. Kun huomioidaan, että väestö tulee muuttumaan, ennen kaikkea ikääntymään, havaitaan haittojen olevan tulevaisuudessa moninkertaisia nykytilanteeseen verrattuna jo 2050. Vuoteen 2080 haittojen arvioidaan edelleen lisääntyvän, mutta samalla laskentaan liittyvät epävarmuuden kasvavat entisestään. On myös edelleen syytä muistaa, että laskelmat edustavat epärealistista tilannetta, jossa sopeutumista ei tapahdu lainkaan.

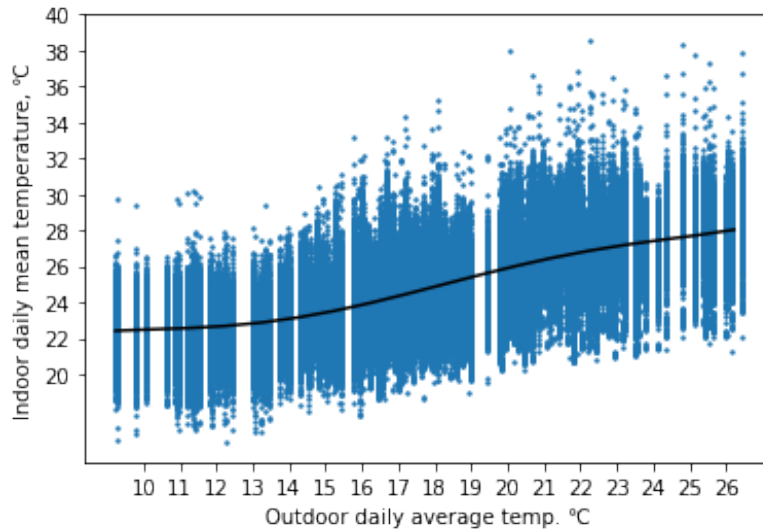
Taulukko 6.2. Helleaaltojen vaikutukset kuolleisuuteen ja sairaalakäynteihin tulevaisuudessa yli 65-vuotiailla, jos adaptaatiota ei tapahdu.

	2050			2080		
	SSP 1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP 1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Uusimaa						
Nykyinen väestö						
Kuolleisuus	51	61	85	56	89	171
Sairaalakäynnit	55	66	92	61	97	186
Tuleva väestö						
Kuolleisuus	147	176	245	195	309	593
Sairaalakäynnit	132	158	221	176	279	535
Pohjois-Pohjanmaa						
Nykyinen väestö						
Kuolleisuus	8	10	15	10	16	35
Sairaalakäynnit	12	16	23	15	25	56
Tuleva väestö						
Kuolleisuus	20	25	37	29	49	108
Sairaalakäynnit	26	33	49	38	64	141

6.2 Sisälämpötilan yhteys ulkolämpötilaan

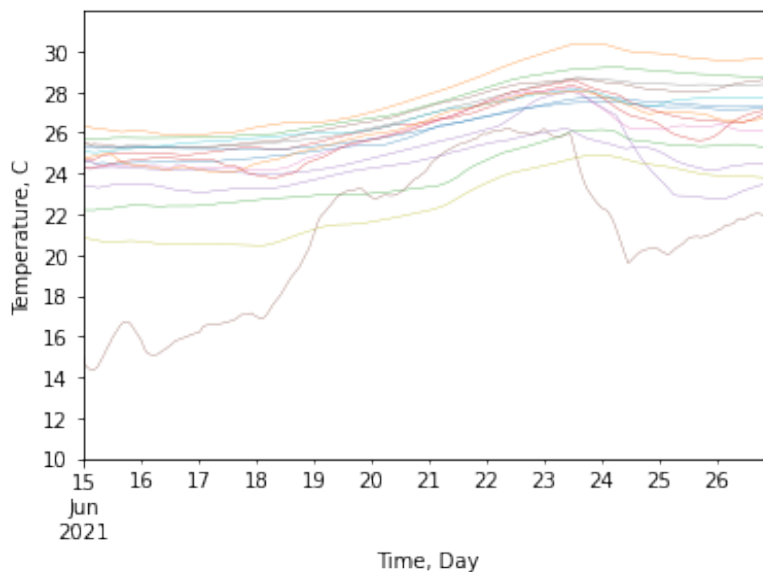
Päivittäinen sisälämpötila (vuorokauden keskiarvo) oli lähes lineaarisessa yhteydessä päivittäiseen ulkolämpötilaan (asunnon sijainnista riippuen Helsinki-Kaisaniemen tai Helsinki-Vantaan mittausasema) kesällä 2021 helsinkiläisissä kerrostaloasunnoissa (kuva 6.14). Korrelaatiokerroin oli 0,72. Vaihtelu asuntojen välillä oli kuitenkin suurta: esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa 22 °C vaihteli sisälämpötila noin 22 ja 33 asteen välillä ja yksittäisissä asunnoissa havaittiin tätäkin korkeampia lämpötiloja. Siten ulkolämpötilan ja väestötasolla havaittujen terveyshaittojen välisen yhteyden perusteella ei voi päätellä, mikä on terveydelle haitallinen sisälämpötila: vaikka kuolleisuuden havaitaan olevan selkeästi koholla esimerkiksi päivinä, jolloin ulkolämpötila on em. 22 astetta, ei voida tietää kohdistuvatko haitat kaikissa asunnoissa asuviin, vai esimerkiksi vain asuntoihin, joissa sisälämpötila on yli 30 astetta ko. päivinä.

Kuva 6.14. Sisälämpötilan yhteys ulkolämpötilaan kesän 2021 aikana Helsingissä.



Asuntojen välillä on suuria eroja lämpötilassa myös helleaaltojen aikana (kuva 6.15). Kaikissa asunnoissa sisälämpötila kohoaa viiveellä helleaallon alkaessa, ja toisaalta sisälämpötila myös laskee viiveellä ulkolämpötilan laskiessa. Kuumimmissa asunnoissa sisälämpötila on kuitenkin saattanut olla koholla jo ennen helleaaltoja ja ne voivat lämmetä nopeammin ja jäähtyä hitaammin helleaallon yhteydessä kuin viileämmät asunnot.

Kuva 6.15. Sisälämpötilan yhteys ulkolämpötilaan (Kaisaniemi, alin lämpötilakäyrä) lyhyen helleaallon aikana (18.–23.6.2021) 15 asunnossa Helsingissä. Asunnot valittu astetuntien (yli 27 °C) perusteella: 5 kuuminta, 5 kylmintä ja 5 keskivertoa.



Yli 80 % asunnoista sisälämpötila oli yli 27 °C vähintään yhden päivän ajan kesällä 2021 ja hieman alle puolessa lämpötila ylitti ko. rajan yhtäjaksoisesti viikon ajan (taulukko 6.4). Vajaassa 10 % asunnoista lämpötila ylitti 30 °C päivän ajan, mutta vain reilussa prosentissa viikon ajan. Kolmenkymmenen kahden asteen lämpötilat olivat harvinaisia.

Taulukko 6.4. Korkeiden sisälämpötilojen esiintyminen kesän 2021 aikana helsinkiläisissä kerrostalo-asunnoissa. Taulukossa on esitetty, kuinka suuressa osassa (%) kaikista mitatuista asunnoista sisälämpötila ylitti tietyn lämpötilan yhden tai useamman peräkkäisen päivän ajan.

Tunti-lämpötila ylittää:	1 päivä	2 päivää	3 päivää	4 päivää	5 päivää	6 päivää	7 päivää
27 °C	82,9	76,1	67,9	58,7	52,2	47,3	44,5
28 °C	58,3	48,5	40,2	32,4	25,7	21,4	19,5
29 °C	29,5	22,5	17,2	12,9	9,6	7,0	6,1
30 °C	9,3	6,4	4,6	3,3	2,2	1,8	1,6
31 °C	2,2	1,7	1,3	0,8	0,4	0,2	0,2
32 °C	0,5	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
33 °C	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
34 °C	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0

6.3 Korkeiden sisälämpötilojen terveysvaikutukset

Kesäajan korkeiden lämpötilojen ja helleaaltojen vaikutus terveyshaittoihin tunnetaan hyvin. Lukuisat tieteelliset tutkimukset ympäri maailmaa, myös Suomessa, ovat osoittaneet kuumun sään lisäävän muun muassa väestön kuolleisuutta ja erilaisiin sairauksiin liittyvää hoidon tarvetta. Valtaosa helteen vaikutuksia koskevista tutkimuksista on kuitenkin tarkastellut ulkoilman lämpötilan yhteyttä terveyteen. Sisälämpötilan vaikutukset tunnetaan huomattavasti heikommin tutkimusasetelmiin liittyvistä haasteista johtuen. Sisälämpötilan terveysvaikutusten ymmärtäminen on kuitenkin tärkeää, sillä ihmiset, erityisesti kuumuuden haitoille herkät väestöryhmät (ikäntyneet, pitkäaikaissairaat), viettävät valtaosan ajastaan sisätiloissa. Rakennusten olosuhteet määrittävät siten pitkälti sen, kuinka suuri terveysriski kuumasta säästä aiheutuu. Työpaketissa 4 tehtiin kirjallisuuskatsaus sisälämpötilan terveyshaitoista perustuen aiheesta julkaistuihin epidemiologisiin tutkimuksiin

sekä Maailman terveysjärjestön (WHO) ja muiden toimijoiden laatimiin selvityksiin ja ohjeistuksiin.

6.3.1 Tutkimusnäyttö korkeiden sisälämpötilojen yhteydestä terveyshaittoihin

Korkean sisälämpötilan terveysvaikutuksia tarkastelevista tieteellisistä tutkimuksista on julkaistu viime vuosina kaksi systemaattista katsausta, joihin on koottu alkuvuoteen 2018 mennessä julkaistua tutkimustietoa (Head ym. 2018, Tham ym. 2020). Katsausten perusteella korkea sisälämpötila on yhteydessä erilaisiin terveyshaittoihin. Tutkimusten määrä on kuitenkin melko vähäinen ja laatu vaihteleva. Suurin osa ei raportoinut sisälämpötilan ja haittavaikutuksen välistä altiste-vastesuhdetta jatkuvalla lämpötila-asteikolla, joten haittojen ilmenemiseen liittyvää lämpötilan kynnsarvoa ei pystytty määrittelemään. Tutkimuksissa tarkasteltiin erityyppisiä ja pääosin suhteellisen lieviä vaikutuksia. Korkea sisälämpötila oli yhteydessä muun muassa hengityselinoireilun lisääntymiseen, mielen-terveyden ja kognition häiriöihin liittyvän oireilun pahentumiseen, elimistön ydinlämpötilan nousuun ja verenpaineen laskuun, veren glukoosipitoisuuden laskuun I-tyyppin diabeetikoilla, ikääntyneiden alentuneeseen fyysiseen suorituskyykyyn, unihäiriöihin sekä itseraportoituun lievään oireiluun, kuten päänsärkyyn, huimaukseen ja väsymykseen. Viisi tutkimusta raportoi lämpötilan, jossa vaikutuksia ilmeni, ja tämä lämpötila vaihteli välillä 26 ja 32 celsiusastetta (Tham ym. 2020).

Systemaattisten katsausten jälkeen on julkaistu uutta näyttöä lievistä vaikutuksista. Näissä tutkimuksissa korkeat sisälämpötilat ovat olleet yhteydessä ikääntyneillä muun muassa elimistön lämpötilan nousuun ja verenpaineen laskuun (Kim ym. 2020), sydämen sykkeen ja galvaanisen ihoreaktion kohoamiseen sekä unenlaadun heikentymiseen (Williams ym. 2019) sekä itseraportoituun oireiluun ja terveydentilan/hyvinvoinnin heikentymiseen (Hansen ym. 2022, Teyton ym. 2022) ja nuorilla aikuisilla kognitiivisen suorituskyykyyn heikentymiseen (Cedeño Laurent ym. 2018). Vaikutuksia on todettu ilmenevän jo selvästi alle 30 asteen lämpötiloissa.

Korkeiden sisälämpötilojen ja vakavien terveyshaittojen (hoidon tarve, kuolleisuus) välisen yhteyden tutkiminen on huomattavasti hankalampaa kuin lievien vaikutusten. Vakavat haitat ovat suhteellisen harvinaisia ja edellyttävät laajoja väestötason tutkimuksia, jolloin luotettava altistumisen arviointi henkilökohtaisten mittausten avulla on yleensä käytännössä mahdotonta. Sisätilojen kuumuuden vakavista vaikutuksista on kuitenkin julkaistu joitakin tutkimuksia. New Yorkin kaupungissa Yhdysvalloissa on tarkasteltu korkeiden sisälämpötilojen yhteyttä ensihoidon tarpeeseen (Uejio ym. 2022). Diabetekseen liittyvän ensihoidon tarpeen todettiin lisääntyvän, kun sisäilman lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutusta kuvaava lämpöindeksi ylitti 21,1 astetta. Vaikutus oli tilastollisesti merkitsevä,

kun lämpöindeksi oli korkeampi kuin 30 astetta. Vastaavasti hengityselinsairauksiin liittyvä ensihoidon tarve alkoi lisääntyä lämpöindeksin ylittäessä 24,6 astetta ja oli tilastollisesti merkitsevä yli 34 asteen lämpötilassa. Korkean sisälämpötilan yhteys hengityselinsairauksiin liittyvän ensihoidon tarpeen lisääntymiseen on todettu myös saman tutkimusryhmän aiemmassa tutkimuksessa (Uejio ym. 2016). Molemmissa tutkimuksissa altistumisen arviointi perustui ensihoitajien mukanaan kantamiin ilman lämpötila- ja kosteussensoreihin.

Korkean sisälämpötilan yhteyttä vakaviin terveyshaittoihin on pyritty selvittämään myös asuntojen lämpöolosuhteiden mallinnukseen perustuen. Houstonissa, Texasin osavaltiossa Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa asuntojen kuumentumisen todettiin olevan yhteydessä kuolleisuusriskin ja sairaalahoidon tarpeen lisääntymiseen yli 65-vuotiaiden keskuudessa (O'Lenick ym. 2020). Mallinnetut sisälämpötilat (vuorokauden maksimilämpötila) vaihtelivat välillä 23 ja 48,5 astetta (mediaani 23,2). Tutkimuksessa tehdyn altiste-vastesuhteen lineaarisuusolettaman vuoksi tulosten perusteella ei voi kuitenkaan tehdä johtopäätöksiä altiste-vasteen todellisesta muodosta tai siitä, missä lämpötilassa terveysriski alkaa lisääntyä.

Altistumisen mallinnusta on hyödynnetty myös Taiwanissa tehdyissä tutkimuksissa, joissa korkean sisälämpötilan on todettu olevan yhteydessä hengityselin- ja verenkierroelinsairauksiin liittyvien päivystyskäyntien lisääntymiseen yli 65-vuotiaiden keskuudessa (Jung ym. 2020, Jung ym. 2021). Tutkimuksessa altistumista arvioitiin vuorokauden kumulatiivisten astetuntien avulla. Infektioperäisiin hengityselinsairauksiin liittyvät päivystyskäynnit lisääntyivät tilastollisesti merkitsevästi, kun 27, 28, 29, 30 tai 31 asteen lämpötila ylittyi 69, 40, 14, 5 tai 1 astetunnin verran, vastaavasti. Muihin hengityselinsairauksiin liittyvät päivystyskäynnit lisääntyivät tilastollisesti merkitsevästi, kun 31 asteen raja ylittyi yhdellä astetunnilla. Verenkierroelinsairauksiin liittyvät päivystyskäynnit lisääntyivät puolestaan tilastollisesti merkitsevästi 27, 28, 29, 30 tai 31 asteen lämpötilan ylittyessä 62, 43, 16, 1 tai 1 astetunnilla, vastaavasti. Toisin sanoen päivystyskäyntien voi tulkita lisääntyneen tilastollisesti merkitsevästi vuorokauden keskimääräisen sisälämpötilan ylittäessä noin 29 astetta. Tutkimuksessa määritettyjen vuorokauden kumulatiivisten astetuntirajojen perusteella ei kuitenkaan voi tehdä päätelmiä siitä, kuinka altistumisen jakaantuminen vuorokautta pidemmälle ajanjaksolle vaikuttaa terveysriskiin.

6.3.2 Korkeita sisälämpötiloja koskevat ohjearvot

WHO:n lämpöiihtyvyyttä koskevissa ohjeistuksissa sisälämpötilan ohjearvoksi on annettu 18–24 astetta (WHO 1984, WHO 1987, WHO 1990). Tämä ohjearvo kuvaa lämpötilaa, josta ei katsota aiheutuvan terveysriskiä paikallaan olevalle henkilölle. Ohjearvon perusteet ovat kuitenkin jossain määrin epäselvät ja tutkimusnäyttö ylärajan soveltuvuudesta kuumuudelle herkkien väestöryhmien suojaamiseen on puutteellista (Ormandy & Ezratty 2012,

Kenny ym. 2019). Sisälämpötilojen ja terveyshaittojen välistä yhteyttä koskevan tietopuutteen takia WHO:n vuonna 2018 julkaisemassa asumisterveyttä koskevassa ohjeistuksessa ei ole annettu korkealle sisälämpötilalle ohjearvoa, vaan ohjeistuksiin on kirjattu ainoastaan ehdollinen suositus väestön suojaamiseksi korkeilta sisälämpötiloilta (WHO 2018). Helteen terveyshaittojen ehkäisyyn liittyvissä ohjeistuksissa WHO on puolestaan todennut, että asunnoissa huonelämpötilan olisi suositeltavaa pysyä päivisin alle 32 asteessa ja öisin alle 24 asteessa (WHO 2011). Ikääntyneiden hoivalaitosten osalta WHO suosittelee, että laitoksessa olisi ainakin yksi viileä tila, jossa lämpötila pysyy alle 25 asteessa. WHO on yhteistyössä Global Heat Health Information Network -asiantuntijaverkoston ja Kanadan terveysviranomaisten kanssa parhaillaan käynnistämässä sisälämpötilan terveysvaikutuksiin ja tietotarpeisiin liittyvää selvityshanketta ([Informing decision-making about indoor heat risks to human health](#)).

WHO:n lisäksi myös muut toimijat ovat määritelleet lämpöviihtyvyyteen perustuvia ohjearvoja rakennusten ylälämpenemiselle. Yleisesti sovellettuja ohjeistuksia ovat antaneet muun muassa Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE 2015) sekä American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers (ANSI/ASHRAE 2017). Eri organisaatioiden määrittelemissä ohjearvoissa sisälämpötilan yläraja on asetettu 25–28 asteeseen (WHO 2021). Lämpöviihtyvyyden yhteydestä terveyshaittoihin ei ole kuitenkaan juurikaan tutkimusnäyttöä, erityisesti kuumuuden vaikutuksille herkkien väestöryhmien osalta (Kenny ym. 2019).

Suomessa sosiaali- ja terveysministeriö on antanut terveydensuojelulain nojalla asetuksen asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista (545/2015), jossa määritellään toimenpiderajat huoneilman lämpötilalle lämmityskaudella ja sen ulkopuolella. Lämmityskaudella huoneilman lämpötilojen toimenpiderajat ovat asunnoissa 18–26 °C ja palvelutaloissa, vanhainkodeissa, lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja vastaavissa tiloissa 20–26 °C. Lämmityskauden ulkopuolella toimenpiderajat ovat asunnoissa 18–32 °C, lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja muissa vastaavissa tiloissa 20–32 °C ja palvelutaloissa, vanhainkodeissa ja muissa vastaavissa tiloissa 20–30 °C. Asumisterveysasetuksen soveltamisoppaassa todetaan, että kotihoidon osalta 30 °C ylärajaa voidaan soveltaa myös asuntoihin (Valvira 2016). Asumisterveysasetuksen toimenpiderajojen ylittyessä tai alittuessa sen, kenen vastuulla haitta on, tulee ryhtyä toimenpiteisiin terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa sen poistamiseksi tai rajoittamiseksi. Säädöksen toteutumista valvoo kunnan terveydensuojeluviranomainen, joka tekee tarvittaessa päätöksen terveyshaitan ehkäisemiseksi vaadittavista toimenpiteistä.

Kirjallisuuskatsauksessa ei ollut mahdollista käydä systemaattisesti läpi eri maiden korkeisiin sisälämpötiloihin liittyvää sääntelyä. Tarkastelluissa tutkimuksissa ja selvityksissä ei kuitenkaan tuotu ilmi helleaaltojen aikaisia olosuhteita koskevia lainsäädännöllisesti sitovia raja-arvoja. Kesäajan huonelämpötiloista on kuitenkin annettu viranomaisohjeistuksia.

Esimerkiksi Ruotsin Kansanterveyslaitoksen (Folkhälsomyndigheten) asuntoja, kouluja, vanhainkoteja ja vastaavia rakennuksia koskevissa ohjeistuksissa (FoHMFS 2014:17) ohjearvo huonelämpötilan operatiiviselle lämpötilalle on kesäaikana pitkäaikaisesti korkeintaan 26 astetta ja lyhytaikaisesti korkeintaan 28 astetta. Ohjeistuksessa ei kuitenkaan määritellä selkeästi sitä, mitä pitkäaikaisella tai lyhytaikaisella tarkoitetaan tai kuinka ohjearvon ylittyessä tulisi toimia. Muun muassa näistä syistä ohjeistuksia ollaan parhailaan päivittämässä. Englannissa terveysviranomaiset ovat puolestaan suositelleet, että ikääntyneiden hoivakodeissa tulisi olla viileä tila, jossa huonelämpötila on korkeintaan 26 astetta. Ohjeistus on julkaistu osana Englannin helletoimintasuunnitelmaa ([Heatwave plan for England](#)).

7 Päätelmät ja suositukset

Alalukuihin on koottu kunkin tutkimuspaketin keskeiset päätelmät. Tämän jälkeen luvussa 7.5 on esitetty kootusti hankkeen suositukset.

7.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset tyypillisiin rakenteisiin

Suurin osa Suomessa yleisesti käytettävistä ulkoseinärakenteista toimii rakennusfysikaalisesti hyvin sekä nykyisessä että tulevassa ennustetussa ilmastossa. Hyvän rakennusfysikaalisen toimivuuden edellytyksiä ovat ulkoverhouksen takana oleva avoin tuuletusrako, viistosadetta heikosti läpäisevä julkisivupinta sekä heikosti homehtuvat materiaalit. Tällaisia ulkoseinärakenteita ovat

- betonisandwich-elementit, joiden ulkokuoren betoni on tiivistä tai ulkopinnassa on vesitiivis mutta vesihöyryä läpäisevä pinnoite
- ohutrappaus-eristejärjestelmä vesitiiviillä, mutta vesihöyryä läpäisevällä pinnoitteella
- tiilimuuratut julkisivut, joiden taustalla on vähintään 20 mm levyinen toimiva tuuletusrako
- puuverhotut puurankarunkoiset ulkoseinät, jossa julkisivuverhouksen taustalla on vähintään 20 mm levyinen toimiva tuuletusrako.

Yleistäen voidaan todeta, että ne rakenteet, jotka toimivat hyvin nykyilmastossa toimivat hyvin myös tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa, vaikka laskennalliset homeindeksit niissä rakenteissa hieman kohoavatkin.

Asuinkerrostalojen ulkoseinärakenteen laskennallisissa tarkasteluissa homehtumisriski on suurin erilaisilla tiilijulkisivuilla sekä korkean vesi-sementtisuhteen betonisandwich-julkisivuilla, joiden julkisivupinnan taustalla tuuletus on puutteellinen. Näissä julkisivumateriaaleissa ulkopinta on huokoinen ja kapillaarinen ja siksi hyvin viistosadetta läpäisevä ja toisaalta suuren huokostilavuuden vuoksi myös hitaasti kuivuva. Tuuletusraon puute tai heikko toimivuus lisää oleellisesti näiden ulkoseinärakenteiden homehtumisriskiä.

Asuinkerrostaloissa tällaisia nykyilmastossa heikosti toimivia ulkoseinärakenteita ovat

- betonisandwich-elementtijulkisivut, joissa ulkokuoren betonin on hyvin huokoista
- tiili-villa-betoni-rakenteet, joissa ei ole toimivaa tuuletusta tiilijulkisivun taustalla.

Asuinkerrostaloissa ulkoseinärakenteen homehtumisriski on suurin 1960–1989 välillä rakennetuissa betonielementtikerrostaloissa, joissa betoniulkokuoren säilyvyysominaisuuksissa on yleisesti puutteita betonin pakkasenkestävyyden ja raudotteiden korroosion kannalta. Näissä rakennuksissa on tyypillisesti 1960- ja -70-luvuilla rakennusten päädyt tehty tiili-villa-betoni-rakenteina, joissa 75 %:ssa tapauksissa homeindeksi nousee yli 1:n. Kaikkiaan sellaisia asuinkerrostaloja, joissa nomeindeksi on koholla on 23941 kappaletta, jos oletetaan, että kerrostalon seinärakenne on kauttaaltaan edellä mainitun kaltainen. Erityisesti 1960- ja -70-lukujen asuinkerrostaloissa esiintyy erilaisia ulkoseinärakenneyhdistelmiä. Usein päädyissä on tiili-villa-betonirakenne ja rakennuksen pitkillä sivuilla betonisandwich-elementit. Näiden lisäksi esimerkiksi parvekkeiden taustaseinillä on tuohon aikaan käytetty kevyitä puurankarunkoisia seiniä sekä rakennuksen pitkillä sivuilla levy-villa-betoni-rakenteita. Yksittäisen asuinkerrostalon kohdalla onkin syytä tarkastella useamman seinärakenteen homeindeksiä, jotta voidaan arvioida ko. rakennuksen vaurioherkkyyttä.

Ilmastonmuutoksen seurauksena RCP8.5-skenaariolla homeindeksi kasvaa betonisandwich-elementeissä siten, että 75 %:ssa tapauksista homeindeksi ylittää arvon 1. Tiili-villa-betonirakenteissa homeindeksi pysyy samassa tasossa kuin nykyilmastossa. Riskialttiiden rakennusten määrä pysyy samana, mutta homeenkasvun todennäköisyys kasvaa.

Vakavin tilanne sekä nykyisessä että tulevassa ilmastossa on puurunkoisissa omakoti-, pari- ja rivitaloissa, joissa julkisivuna on tiiliverhous huonosti toimivalla tuuletusraolla. Homeindeksi ylittää näissä tyypillisesti 1970–1980 -luvulla rakennuksissa nykyilmastossa arvon 3, joka on korkein koko tutkimuksessa saatu homeindeksin arvo. Tällaisia rakennuksia on yhteensä 172977 kappaletta. Tällaisia rakennuksia on rakennettu paljon. Toinen vaurioherkkä ulkoseinärakenne on betonisandwich-elementti samasta syystä kuin asuinkerrostaloissa. Betonisandwich-elementtejä on kuitenkin käytetty varsin vähän omakoti-, pari- ja rivitaloissa verrattuna puu- ja tiilijulkisivuihin. Kaikkiaan homeindeksi on koholla 223154 rakennuksessa, jos oletetaan, että julkisivurakenne on kok. rakennuksessa samanlainen.

Ilmastonmuutoksen seurauksena edellisten ulkoseinärakenteiden lisäksi tuuletusraottoman tiili-villa-tiili-seinärakenteen homeindeksi nousee yli 1:n ankarimmalla RCP8.5-skenaariolla. Betonisandwich-elementin ja tiiliverhotun puurunkoisien ulkoseinärakenteen homeindeksit pysyvät nykyilmaston tasolla. Ilmastonmuutoksen seurauksena homeindeksi on siten koholla kaikkiaan 200808 omakoti- pari- ja rivitaloissa, jotka ovat valmistuneen 1960–1989.

Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyksiluokalla on suuri vaikutus laskentatuloksiin. Puurunkoisissa ulkoseinissä yleisesti käytetyn kipsilevytuulensuojan pinnassa oleva kartonki kuuluu herkimmin homehtuviin (HHL1), joten se yhdessä heikosti tuulettuvan kuorimuurirakenteen kanssa on riskirakenne jo nykyilmastossa ja homehtumisriski kasvaa tulevaisuuden ilmastoskenaarioilla.

Säälle alttiiden rakenteiden säilyvyyden kannalta merkittävin ilmastonmuutoksen aiheuttama riski ovat lisääntyvät viistosateet, sillä kosteus on mukana lähes kaikissa vauriomekanismeissa tarkasteltavasta materiaalista riippumatta. Siten myös rakenteiden säilyvyyden kannalta oleellista on, että säälle alttiissa rakenteissa kosteus ei joko pääse kertymään rakenteisiin tai jos pääseekin, se pääsee myös kuivumaan. Nykymääräysten mukaisella rakentamisella myös tulevaisuuden ilmastossa rakenteet saavuttavat käyttöikävaatimuksensa, mutta toisaalta vaatimuksia esimerkiksi pakkasenkeston kannalta ei tule myöskään keventää, vaikka rasiustaso arvion mukaan laskeekin.

Vesistötulvat ovat alueellinen ongelma, joka koskettaa erityisesti omakoti- ja paritaloja tulvariskialueilla. Tunnetuilla tulvariskialueilla sijaitsee yhteensä 17041 rakennusta. Lähes 50 % tulvariskialueilla sijaitsevista rakennuksista sijaitsee Porissa (27 %) ja Rovaniemellä (20 %). Rankkasateiden aiheuttamien kaupunkitulvien vaikutusten arviointi on huomattavasti vaikeampaa, koska siihen vaikuttavat oleellisesti kaupunkien viemäriverkostojen kapasiteetti ja sadeveden maaperään imeytymismahdollisuudet. Kaupunkien keskusta-alueilla asfaltoidut alueet lisäävät rankkasadetulvien rakennuksille aiheuttamien vaurioiden riskiä.

7.2 Kosteusvaurioiden yhteys terveyshaittoihin

Tässä raportissa keskityttiin tarkastelemaan systemaattisella kirjallisuuskatsauksella kosteusvaurion yhteyttä astman riskiin, koska se on tärkein kosteusvaurioiden pitkäaikaisvaikutus. Koska aiemman tutkimistiedon pohjalta ei voida erotella eriasteisten ja eri rakennuksen osissa (huoneissa) esiintyvien kosteusvaurioiden, eikä myöskään ilmastonmuutokseen liittyvien kosteusvaurioiden terveysvaikutuksia, on oletettavaa, että jos kosteusvauriot lisääntyvät ilmastonmuutoksen seurauksena, niiden voidaan olettaa vaikuttavan terveyteen kuten muutkin kosteusvauriot. Toisin sanoen niiden vaikutukset terveyteen ovat riippuvaisia altistumisesta (ilmayhteys asuintiloihin) ja altistumisajasta.

Tarkastelimme lisäksi toisen systemaattisen kirjallisuuskatsauksen avulla kosteusvaurioon liittyvien mikrobien tai niiden markkereiden yhteyttä terveyteen. Tämän katsauksen perusteella voidaan todeta, että aiemmassa epidemiologisessa kirjallisuudessa ei ole vakuuttavasti vastattu kysymyksiin mikrobialtistuksen vaikutuksesta kosteusvaurioihin liittyviin terveysvaikutuksiin. Mikään yksittäinen mikrobi, sen markkeri tai mikrobisto ei ollut johdonmukaisesti yhteydessä kosteusvaurioon ja terveyshaittoihin. Aiempien epidemiologisten tutkimusten perusteella on mahdollista ennustaa, miten paljon ulkoseinärakenteissa lisääntyvät kosteusvauriot tulevat lisäämään terveyshaittoja ja vaikuttavatko ne sisäilman mikrobiston kautta terveyteen. Koska vain pieni osa systemaattisen katsauksen tutkimuksista oli pitkittäistutkimuksia pidemmällä seuranta-ajalla sekä tutkimusmenetelmät näytteiden keräyksestä mikrobien analysointiin vaihtelivat, eikä monitestausongelmaa yleensä otettu

huomioon, tutkimustulosten vertailu oli vaikeaa ja tutkimuksista saatuja tuloksia pitää tulkita varauksella.

7.3 Rakennusten yllämpeneminen

Kaikki aktiivista jäähdytystä vailla olevat esimerkkikohteet, jotka edustavat tyypillisiä suomalaisia rakennuksia, yllämpenevät merkittävästi vuoden 2018 äärimmäisen kuuman hellekesän aikana. Esimerkkikohteista vanhaa olemassa olevaa rakennuskantaa edustava vanhainkoti ja kerrostalo sekä uutta rakennuskantaa edustava pientalo yllämpenevät merkittävimmin ja niissä asukkaiden kokemana lämpöviihtyvyys vaarantuu eniten. Passiivisilla auringonsuojaratkaisulla ja tuuletusikkunoiden käytöllä voidaan vähentää yllämpenemistä merkittävästi ja kustannustehokkaasti, mutta ne eivät yksistään riitä torjumaan yllämpenemistä ja takaamaan viihtyisiä lämpöoloja tyypillisissä suomalaisissa rakennuksissa äärimmäisen kuuman hellekesän aikana nykyisissä ilmasto-oloissa.

Tähän tutkimukseen valitut passiiviset auringonsuojaratkaisut: kaihtimet, ulkoinen aurinkolippa ja auringonsuojalasit edustavat tyypillisiä Suomessa käytettyjä auringonsuojaratkaisuja. Vaikka passiivisilla auringonsuojaratkaisulla voidaan vähentää yllämpenemistä merkittävästi, on valon saantiin vaikuttavien ratkaisujen, kuten kaihtimien, suunnittelun yhteydessä tärkeää varmistaa riittävä päivänvalon saanti oleskelutiloissa. Tuuletusikkunoiden käytöllä ei myöskään pidä heikentää sisäilman laatua tai lisätä huonetilojen melutasoa. Lisäksi passiivisten auringonsuojaratkaisujen ja ikkunatuuletuksen käyttö vaatii ratkaisusta riippuen asunnon käyttäjältä aktiivisuutta ja toimintakykyä. Myös automatisoituja auringonsuojaratkaisuja sekä koneellisesti avattavia ikkunoita on olemassa, mutta ne ovat manuaalisesti käytettäviä ratkaisuja kalliimpia ja ne vaativat enemmän huoltoa ja ylläpitoa.

Aktiivisen jäähdytyksen käyttö on suositeltavaa aloittaa siinä vaiheessa, kun muut yllämpenemisen torjuntatoimenpiteet eivät riitä ylläpitämään viihtyisiä huonelämpötiloja. Passiivinen auringonsuojaus yhdessä aktiivisen jäähdytyksen kanssa mahdollistavat huonelämpötilojen hallinnan kaikissa esimerkkikohteissa äärimmäisen kuuman hellekesän 2018 aikana. Tällöin aktiivisen jäähdytyksen sähkönkulutus on esimerkkirakennuksissa vain noin 3–4 kWh/m², joten jäähdytyksen sähkönkulutus on suhteellisen vähäistä rakennuksen muuhun sähkönkulutukseen ja saavutettavaan hyötyyn verrattuna.

Uudisrakennuksia edustavien esimerkkirakennusten joukosta vanhainkotia ja kerrostaloa koskeva rakentamismääräysten kesäaikainen huonelämpötilavaatimus vähentää yllämpenemistä, mutta se ei riitä takaamaan viihtyisiä lämpöoloja äärimmäisen kuuman hellekesän aikana nykyisissä ilmasto-oloissa. Huonelämpötilavaatimuksen täyttäminen edellyttää uudisvanhainkodissa ilmanvaihdon aktiivisen jäähdytyksen käyttöä eikä asu-
misterveysasetuksen vanhainkodeille sovellettava toimenpideraja 30 °C tällöin ylity.

Rakentamismääräyksen huonelämpötilavaatimuksen täyttävässä uudiskerrostalossa asu-
misterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ei ylity, mutta kotihoidossa oleville vanhuksille
käytettävä toimenpideraja 30 °C ylittyy.

Ilmastonmuutos lisää aktiivista jäähdytystä vailla olevien rakennusten yllämpenemistä
tulevaisuudessa ja äärimmäisen hellekesän huonelämpötilat 1000 kuumimman tunnin
aikana nousevat vuoteen 2050 mennessä keskimäärin noin 1–2 °C päästöskenaariosta
riippuen verrattuna vuoden 2018 hellekesän huonelämpötiloihin. Passiivisella auringon-
suojuksella ja aktiivisella jäähdytyksellä pystytään hallitsemaan huonelämpötiloja ja
estämään esimerkkirakennusten yllämpeneminen myös vuoden 2050 ilmastossa riippu-
matta päästöskenaariosta. Ilmastonmuutos kasvattaa aktiivisen jäähdytyksen sähkönku-
lutusta esimerkkikohteissa noin 1–2 kWh/m² vuoteen 2050 mennessä päästöskenaariosta
riippuen, joten jäähdytyksen sähkönkulutus on suhteellisen vähäistä myös tulevaisuuden
ilmastossa.

Nykymääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen täyttävässä uudisvanhain-
kodissa nykyisen asumisterveysasetuksen toimenpideraja 30 °C ei ylity vuoden 2050
ilmastoa kuvaavan äärimmäisen kuumen hellekesän aikana edes korkeimmalla päästö-
skenaariolla RCP8.5. Sen sijaan nykyisen huonelämpötilavaatimuksen täyttävässä uudis-
kerrostalossa nykyisen asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ylittyisi silloin kaikilla
päästöskenaarioilla.

Tässä simulointitutkimuksessa asukkaiden kokemaa lämpöviihtyvyyttä arvioitiin PMV-in-
deksin sekä SFS-EN 16798-1 standardin määrittämien sisäympäristön laatuluokkien (I-III)
avulla. Tulosten perusteella missään esimerkkikohteessa ei pystytä ylläpitämään asukkai-
den kokemaa lämpöviihtyvyyttä ilman aktiivisen jäähdytyksen käyttöä edes kohtalaisessa
sisäympäristön laatuluokassa III, jota voidaan soveltaa olemassa oleville rakennuksille. Sen
sijaan kaikissa esimerkkikohteissa pystytään ylläpitämään uusille ja remontoituille raken-
nuksille soveltuvaa sisäympäristön laatuluokkaa II tai laatuluokkaa III passiivisia auringon-
suojaratkaisuja sekä aktiivista jäähdytystä hyödyntämällä sekä nykyisessä että 2050-luvun
ilmastossa päästöskenaariosta riippumatta. Korkeinta sisäympäristön laatuluokkaa I, jota
voidaan soveltaa esimerkiksi iäkkäille ihmisille, ei pystytä ylläpitämään jatkuvasti äärim-
mäisen kuumen hellekesän aikana nykyisessä tai tulevaisuuden ilmastossa. Mutta, tuloksia
arvioitaessa on syytä korostaa, että koettu lämpöviihtyisyys riippuu voimakkaasti henkilöi-
den aktiivisuustasosta sekä vaatetuksesta ja lisäksi erityisesti iäkkäiden tai sairaiden ihmis-
ten kokema lämpöviihtyvyys voi poiketa merkittävästi terveiden aikuisten kokemasta läm-
pöviihtyvyydestä, jota tämän tutkimuksen tulokset edustavat.

Simulointitutkimuksessa käytetyt esimerkkirakennukset edustavat tyypillisiä suomalaisia rakennuksia, joten simuloitujen huonelämpötilat antavat hyvin suuntaa rakennusten lämpöoloista ja ylläpölymisriskistä Suomen rakennuskannassa äärimmäisen kuumien hellekesän aikana.

Rakennusten aktiivinen jäähdytys on toteutettu Suomessa pääosin rakennus- tai asunto-kohtaisilla lämpöpumpuilla ja kaukojäähdytetyillä rakennuksilla on Suomessa kymmenellä eri paikkakunnalla kaikkiaan vain hieman alle 900, joka on 0,06 % Suomen rakennuksista. Kaukojäähdytystä käytetään pääosin suurien kiinteistöjen jäähdytykseen ja sen käyttö on tällä hetkellä suhteellisen vähäistä asuinrakennuksissa. Suomessa on myyty lähes 1,1 miljoonaa ilmalämpöpumppua, jotka soveltuvat rakennusten jäähdyttämiseen. Ilmalämpöpumppujen asennusmäärästä eri rakennustyypeissä ei ole tilastoitua tietoa, mutta arvion mukaan ilmalämpöpumpulla varustettujen pientalojen osuus voi olla jopa 70 %. Arvion mukaan jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla varustettujen kerrostaloasuntojen osuus on vain 4 %, joten asuinrakennusten ylläpölymisriski on arvion mukaan vakavin ja laajin muihin asuinrakennuksiin verrattuna.

7.4 Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat

Tavanomaista korkeampi ulkolämpötila on kesäisin yhteydessä niin lisääntyneeseen kuolleisuuteen kuin sairaalahoidon tarpeeseenkin. Korkea lämpötila aiheuttaa vakavia terveyshaittoja lähinnä ikääntyneillä eli yli 65-vuotiailla. Heidän herkkyyttään lisäävät ikääntymiseen liittyvät tavanomaiset fysiologiset muutokset sekä kroonisten sairauksien yleistyminen. Kansanterveydellisesti merkittävät vakavat terveyshaitat aiheutuvat helleaalloista, eli useampia päiviä kestävästä pitkittyneistä jaksoista, jolloin lämpötila on tavanomaista korkeampi. Tässä hankkeessa hellepäivän rajana käytettiin noin 21 celsiusastetta (vuorokauden keskilämpötila).

Helleaallot ovat jo nykyilmastossa merkittävä terveysriski. Esimerkiksi Uudellamaalla arvioitiin helleaalloista aiheutuvan vuosittain keskimäärin 35 kuolemaa ja 38 sairaalahoitajaksoa; vuosien välillä on kuitenkin suurta vaihtelua. Lähitulevaisuudessa helteen vakavat terveyshaitat lisääntyvät Suomessa väistämättä ikääntyneiden määrän kasvaessa, jos varautumista helleaaltoihin ei paranneta nykyisestä.

Luotettavien ennusteiden tekeminen helteen terveyshaitoista pidemmälle tulevaisuuteen on hyvin vaikeaa monien epävarmuuksien vuoksi. Tulevaisuuden terveysriskit riippuvat paitsi siitä, millaiseksi ilmasto kehittyy (eli kuinka voimallisesti ilmastonmuutosta torjutaan), myös siitä, millainen on Suomen tulevaisuuden väestö niin lukumääräisesti, ikärakenteeltaan kuin perusterveydentilaltaankin. Siitä ei kuitenkaan ole epäselvyyttä, etteivätkö haitat tulevaisuudessa huomattavasti kasva, todennäköisesti moninkertaistu, jos uuteen

ilmastoon ei sopeuduta. Vääjäämättä sopeutumista tapahtuu jossain määrin, mutta lopullisen sopeutumisen asteen määrittelevät suunnitelmalliset sopeutumistoimet niin yksilön kuin yhteiskunnan tasolla.

Vietämme suurimman osan ajasta sisätiloissa, joten sisätilojen lämpötila on terveyden kannalta merkityksellisempi kuin ulkolämpötila. Tällä hetkellä tiedetään, kuinka korkeassa ulkolämpötilassa terveyshaitat alkavat lisääntyä. Ulkolämpötilan kynnyksarvosta ei voi kuitenkaan päätellä sisälämpötilan kynnyksarvoa, sillä helleaaltojen aikana asuntojen lämpötiloissa havaittiin hyvin suurta vaihtelua. Helleaaltojen aikana Helsingissä 30 °C sisälämpötilat eivät joka tapauksessa olleet harvinaisia. Tutkimustietoa sisälämpötilan yhteydestä vakaviin terveyshaittoihin on vähän, mutta haittoja on raportoitu myös alle 30 °C lämpötiloissa.

7.5 Suositukset

Laskennallisten tarkastelujen perusteella ulkoseinärakenteen homeutumisoriski on suurin sellaisilla rakenteilla, joissa julkisivu on hyvin sadevettä läpäisevä, huokosrakenteeseen mahtuu paljon kosteutta ja julkisivun takana tuuletus on heikkoa. Tällaisissa rakennuksissa rakenteen ilmavuodot sisäilmaan erilaisten ikkunoiden ja läpivientien liitoskohdista tai puurunkoisessa talossa höyrynsulun epäjatkuvuuskohdista voivat tuoda mukanaan epäpuhtauksia ja siten altistaa asukkaat terveyshaitalle. Näissä tyypillisesti 1960–1980-luvuilla rakennetuissa rakennuksissa on suositeltavaa selvittää rakenteiden kunto systemaattisella kuntotutkimuksella, johon kuuluu myös rakennuksen vaipan ilmanpitävyyssmittaukset. Korjaustarpeet määräytyvät kuntotutkimuksen perusteella. Laaja-alaisissa ja pitkälle edenneissä vaurioissa korjaustoimenpiteenä on usein julkisivun ja lämmöneristeen purkaminen sekä rakenteellisten vaurioiden korjaus. Toisessa ääripäässä on rakenteiden tiivistäminen, jolla estetään haitallisten aineiden kulkeutuminen sisäilmaan. Kaikki korjaukset on suunniteltava kattavan kuntotutkimuksen perusteella, jotta korjaustoimet kohdistetaan oikein. Lisäksi tiivistyskorjaukset edellyttävät aina rakennuksen ilmanvaihdon ja lämmitysjärjestelmän tasapainotusta korjaustoimien jälkeen.

Rakennuksissa, joissa on riittämätön ilmanvaihto sisäilman kosteustuottoon nähden, sisäilman kosteus ei pääse poistumaan rakennuksesta tehokkaasti. Seurauksena voi olla korkea sisäilman kosteus, joka pyrkii poistumaan diffuusion vaikutuksesta rakenteiden läpi lisäten kosteuskertymää rakenteiden sisään ja siten nostaa rakenteiden vaurioitumisriskiä. Heikko ilmanvaihto myös nostaa asuintilojen lämpötilaa hellejaksoilla. Yöaikaista ilmanvaihtoa on suositeltavaa tehostaa hellejaksojen aikana yllämpenemisen hillitsemiseksi ja riittävästä ilmanvaihdosta on huolehdittava myös muita aikoina.

Tunnistetuille tulva-alueille (ks. taulukot 3.12–3.14) ei tule kaavoittaa rakentamista ilman riittäviä tulvasuojauksia. Kaupunkien hulevesiverkostot ovat yleisesti jo vanhoja, ja niiden mitoitus riittämätön rankkasadetulville. Keskusta-alueilla, joissa sadevesi ei pääse imeytymään nopeasti maaperään, tulee tarkastella hulevesiverkoston uusimista sekä hulevesien johtamista hallitusti viheralueille. Vanhoilla rakennusalueilla vesijohto- ja viemäriverkostoissa on myös korjausvelkaa ja korjaustarve lisääntyy tulevana vuosina. Verkostojen tulevissa peruskorjauksissa suositellaan mitoittamaan hulevesijärjestelmät oleellisesti nykyistä suuremmille vesimäärille, jotta kapasiteetti on riittävä myös tulevaisuuden ilmastossa. Erityisesti uusilla rakennettavilla alueilla, mutta mahdollisuuksien mukaan myös vanhoilla rakennusalueilla, suurempien hulevesimäärien imeytys viheralueille tulisi olla ensisijainen vaihtoehto. Kaupunkien riittävän laajat viheralueet vähentävät myös rakennuksiin kohdistuvaa lämpöhaittaa.

Passiiviset auringonsuojakeinot sekä ikkunatuuletuksen käyttö vähentävät rakennusten yllämpenemistä merkittävästi ja kustannustehokkaasti, mutta ne eivät yleensä ole riittäviä ilman aktiivista jäähdytystä tyypillisissä suomalaisissa rakennuksissa hellejaksojen aikana. Vaikka passiivisilla auringonsuojaratkaisuilla voidaan vähentää yllämpenemistä merkittävästi, on valon saantiin vaikuttavien ratkaisujen, kuten kaihtimien, suunnittelun yhteydessä tärkeää varmistaa riittävä päivänvalon saanti oleskelutiloissa. Tuuletusikkunoiden käytöllä ei myöskään pidä heikentää sisäilman laatua tai lisätä huonetilojen melutasoa. Ohjeistusta tulisi lisätä siitä, kuinka yllämpenemisen torjunta passiivisten ratkaisujen avulla otetaan aiempaa paremmin huomioon mahdollisimman aikaisessa vaiheessa rakennusten suunnittelua. Toimia tarvitaan kaikentyyppisiin asuinrakennuksiin. Vakavien terveyshaittojen ehkäisyn kannalta aktiivista jäähdytystä tulisi lisätä ensisijaisesti rakennuksissa, joissa on yli 65-vuotiaita tai kroonista sairauksista kärsiviä – selkeimmin tällaisia kohteita ovat sairaalat ja palvelutalot, mutta myös esimerkiksi asunnot, joissa on kotihoidon piiriin kuuluvia. Terveyshaitat esiintyvät helleaaltojen aikana, ja tällöin aktiivista jäähdytystä tarvitaan asuntojen korkeimpien lämpötilojen alentamiseen. Jäähdytys tulisi toteuttaa energiatehokkaasti, eikä aktiivisella jäähdytyksellä asunnon lämpötilaa saa laskea liian alas, jotta rakenteisiin ja pintoihin ei muodostu kondenssia.

Aktiivisen ja passiivisen jäähdytyksen, mutta myös muiden varautumistoimien, merkitystä korostaa se, että ilman lisätoimia tulevat helteen terveyshaitat jo lähitulevaisuudessa entisestään lisääntymään väestön ikääntyessä. Tähän liittyen olisi huonelämpötilan lämmityskauden ulkopuolisia toimenpiderajoja (STM 545/2015) hyvä tarkistaa, sillä haittoja on tutkimuksissa raportoitu myös rajoja alhaisemmissa lämpötiloissa. Tutkimustiedon vähäisyyden vuoksi on kuitenkin vaikea määrittellä yksiselitteistä rajaa, jonka ylittyessä vakavat haitat alkaisivat nopeasti lisääntyä herkissä väestöryhmissä. Kaikkein herkimpien yksilöiden kohdalla, esimerkiksi vaikeasta sairaudesta kärsivän ikäihmisen ollessa kyseessä, on mahdollista, että vähäisempikin huonelämpötilan nousu voi johtaa vakaviin seurauksiin.

Uudisrakennusten energiatehokkuusasetuksen (Ympäristöministeriö, 2017) kesäaikainen huonelämpötilavaatimus vähentää uudisrakennusten yllämpenemistä, mutta se ei riitä takaamaan viihtyisiä lämpöoloja äärimmäisen kuuman hellekesän aikana. Kesäaikaisten huonelämpötilojen määräystenmukaisuuden osoittamisessa käytetyn energialaskennan testivuoden (2012) säätiedot on tarkoitettu rakennusten energiankulutuksen laskentaan, eikä niitä ole tarkoitettu huonelämpötilojen mitoittamiseen. Testivuosi kuvaa keskimääräisiä sääolosuhteita, eikä siinä ole äärimmäisen pitkää ja kuumaa hellejaksoa, jonka merkitys on keskeinen kesäajan huonelämpötilojen ja jäähdytystehontarpeen mitoituksessa. Kesäaikaisten huonelämpötilojen ja jäähdytysjärjestelmien mitoittamiseen tulisi käyttää esimerkiksi RAMI-hankkeessa määritettyjä jäähdytyksen mitoituspäiviä. Lisäksi kesäaikaisten huonelämpötilojen pysyvyyttä äärimmäisen hellekesän aikana voisi tarkastella käyttäen simuloinnin säätietoina esimerkiksi vuoden 2018 kesäkuukausien säätietoja. Lisäksi jäähdytysrajan arvoa 27°C, jota käytetään asuinkerrostalojen huonelämpötilan määräystenmukaisuuden osoittamisessa, olisi hyvä laskea lämpöviihtyvyyden ja unen laadun kannalta sopivammalle tasolle. Huonelämpötilojen määräystenmukaisuutta osoitettaessa olisi myös suositeltavaa ottaa käyttöön tilatyypikohtaisesti määritellyt sisäiset lämpökuormat ja tilojen käyttöä kuvaavat tunneittain määritellyt käyttöprofiilit.

Kaavoituksella tai muulla kaupunkirakenteen ja ympäristön muokkaamisella ei tule poistaa rakennuksia varjostavia elementtejä hallitsemattomasti rakennusten läheltä.

7.6 Jatkotutkimustarpeet

Rakennuksissa esiintyy kosteus- ja mikrobivauriota yleensä usean pieleen menneen tekijän seurauksena. Tässä tutkimuksessa selvitettyjen riskirakenteiden ja todellisen vaurioitumisen yhteyttä on syytä selvittää esimerkiksi keräämällä laaja aineisto rakennusten kosteus- ja sisäilmatutkimusten raportteja. Lisäksi laskennallisen homeindeksin tulosten pohjalta tulisi riittävän isolla aineistolla tutkia erilaisten ulkoseinärakenteiden kosteusvaurioiden ja terveyden annos-vastesuhteita, jotta päätöksenteossa voidaan ohjata huomio suurimmassa riskissä ilmastonmuutoksen seurauksena oleviin rakennuksiin ja välttää mahdollisimman hyvin asukkaiden terveyshaitat.

Tässä tutkimuksessa keskityttiin tyypillisten suomalaisten vanhainkotien sekä asuinrakennusten yllämpenemiseen ja sen torjuntaan erilaisten passiivisten ratkaisujen sekä aktiivisen jäähdytyksen avulla. Lisää tutkimustietoa tarvittaisiin siitä, kuinka erilaisilla auringonsuojaratkaisuilla ja esimerkiksi vapaajäähdytysratkaisuilla saataisiin tehokkaammin torjuttua rakennusten yllämpenemistä ilman aktiivisen jäähdytyksen käyttöä. Lisäksi tarvittaisiin tutkimustietoa siitä, kuinka iäkkäiden ja sairaiden ihmisten kokema lämpöviihtyvyys poikkeaa terveiden aikuisten ihmisten kokemasta lämpöviihtyvyydestä.

Lisää tutkimustietoa päätöksenteon tueksi tarvitaan huoneilman lämpötilan yhteydestä terveyshaittoihin erityisesti ikäihmisillä, samoin lämpöviihtyvyyden yhteydestä terveysvaikutuksiin. Lisäksi jatkotutkimuksissa tulisi pyrkiä huomioimaan myös kuolemia ja sairaalakäyntejä lievemmat vaikutukset kuten toimintakyvyn aleneminen ja lisääntynyt avohoidon tarve, joilla on osaltaan merkittävä vaikutus hyvinvointiin.

Liitteet

Liitetaulukko 1. Systemaattinen kirjallisuuskatsaus: rakennusten kosteusvaurioiden yhteys uuden astman syntyyn

Julkaistu	sama tutkimus kuin	Tutkimustyyppi	N	ikä	Maa	kv-havainto	sijainti	kv-indi. lkm	oleskelutilat erikseen
Behbod ym. 2013	2	syntymäkohortti	499	-12kk--> 1 v.	US	I	koti	1	ei
Behbod ym. 2015	1	syntymäkohortti	408	-12kk--> 1 3v.	US	I	koti	1	ei
Cho ym. 2006	4, 10, 20, 21, 23	syntymäkohortti	640	n. 8kk --> 1-v.	US	H	koti, myös kellari; erikseen lmh /alakerran homeen haju	2	ei / haju, kvillä
Cox ym. 2020	3, 10, 20, 21, 23	syntymäkohortti	535/779	<1v --> 3 ja 7 v.	US	H	koti, myös kellari	5	ei
Dannemiller ym. 2014	-	tapaus-verrokki syntymäkohortista	41	1v --> 7 v.	US	H	oleskelutilat ja lmh	3	kyllä
Emenius ym. 2004a	6, 7, 25, 28	tapaus-verrokki syntymäkohortista	540	n. 2kk --> 2 v.	Ruotsi	I+H	koti	5	ei
Emenius ym. 2004b	6, 7, 25, 28	tapaus-verrokki syntymäkohortista	949	n. 2kk --> 2 v.	Ruotsi	I	koti	5	ei
Hedman ym. 2015	-	tapaus-verrokki syntymäkohortista	540	3kk --> 2 v.	Ruotsi	I+H	mh:t ja oleskelutilat	1	kyllä
Hwang ym. 2011	-	kohortti	3 151	<12 v. --> 19v.	Ruotsi	I	koti	1	ei
Hwang ym. 2011	-	tapaus-verrokki syntymäkohortista	564	1-7 v. --> 7-13v.	Taiwan	I	koti	4	ei
Iossifova ym. 2009	3, 4, 10, 20, 21, 23	syntymäkohortti	483	n. 8kk-->3 v.	US	H	koti, myös kellari	1	ei
Jaakkola ym. 2005	-	kohortti	1 916	1-7 v. --> 7-13v.	Suomi	I	koti	5	ei
Karvonen ym. 2009	13	syntymäkohortti	396	n. 5kk -->1.5v	Suomi	H	eri huoneet / koti	11	kyllä
Karvonen ym. 2015	12	syntymäkohortti	396	n. 5kk -->6v	Suomi	H	eri huoneet / koti	22	kyllä
Larsson ym. 2011	-	kohortti	4 779	1-3 v. --> 6-8v.	Ruotsi	I	mh:t, oleskelutilat ja kph	10	lähes
McConnell ym. 2002	-	kohortti	3 535	9-16v. --> 14-21v.	US	I	koti	3	-
Milanzi ym. 2019	-	syntymäkohortti	1 871	3kk-17v. -->17 v	Hollanti	I	oh tai mh	1	kyllä
Nafstad ym. 1998	18	tapaus-verrokki syntymäkohortista (A+C)	251+251	0-2 v.	Norja	I+V	koti	2	ei
Øie ym. 1999	17	tapaus-verrokki syntymäkohortista	344	0-2 v.	Norja	H	koti	1	ei
Pekkanen ym. 2007	-	tapaus-verrokki	362	12-84 kk	Suomi	H	eri huoneet / koti	15	kyllä
Reponen ym. 2011	3, 4, 10, 21, 23	syntymäkohortti	176	n. 8kk ja 7v -->7 v.	US	H	koti, myös kellari	2	ei
Reponen ym. 2012	3, 4, 10, 20, 23	syntymäkohortti	289	n. 8kk -->7 v.	US	H	koti, myös kellari	2	ei
Rönmark ym. 2002	-	kohortti	3 247	7-8 v. --> 9-10v.	Ruotsi	I	koti	1	ei
Schroer ym. 2009	3, 4, 10, 20, 21	syntymäkohortti	570	<1v. -->2v	US	H	koti, myös kellari	1	ei
Shorter ym. 2018	-	tapaus-verrokki	450	1-7 v.	Uusi-Seelanti	H (I)	lmh/ koti/ lmh+oh+kph	9 (6)	kyllä
Thacher ym. 2017	6, 7, 28	syntymäkohortti	3 798	2kk -->16 v.	Ruotsi	I	koti	5	ei
Tischer ym. 2011	-	syntymäkohortti	31 742	0-2v-->10 v.	Saksa	I	koti	1	ei
Wen ym. 2015	-	syntymäkohortti	19 192	0v.-->5 v.	Taiwan	I	koti	1	ei
Wickman ym. 2003	6, 7, 25	syntymäkohortti	3 692	2kk-->3kk-2 v.	Ruotsi	I	koti	1	ei
Nordbäck ym. 2013	osittain A2	kohortti	7 104	nuoret aikuiset --> + 9v.	11 Euroopan maata, Austeralia, US	I +H	eri huoneita/ koti	12	kyllä
Wang ym. 2019	osittain A1	kohortti	11 506	n. 40v -->50v.	Islanti, Norja, Ruotsi, Tanska ja Viro	I	koti	5	ei

kv= kosteusvaurio, N= tutkittavien määrä, ikä= ikä, milloin kv-havainto tehty --> ikä seurannan lopussa tai pelkästään henkilöiden ikä tutkimuksen aikana, kv: I=itse raportoitu, H=havaitti, I+H= molemmat, I+V= itse raportoitu ja vahvistettu, H(I)= molemmat, mutta vain havaittuja kv havaintoja käytettiin tässä katsauksessa, lmh=lapsen makuuhuone, oh= olohuone, kph=kylpyhuone

Liitetaulukko 2. Systemaattinen kirjallisyyskatsaus: rakennusten kosteusvaurioiden yhteys mikrobeihin ja niiden yhteys terveyteen

Julkaisu	Sama kuin	Tutkimustyyppi	N	A/L	Maa	Kv-havainto	Rakennus	N (näytämäärä) ja tapa	A	B	C	D	E
Adams ym. 2021	18	HITEA, poikkileikkaus	1402 + 1332	L	Suomi ja Hollanti	H	16 koulua	463 pölynäyte (EDC)	8+ >9 000 (kaikki suvut ja ASV:t)	15	↑↑ 6 ja ↓↓ 1	1	1
Behbod ym. 2015	35	prospekt.13v., syntymäk.	408	L	US	I	499 kotia	496 ilma- ja pölynäytettä	7(*2-3)	0	-	1	4
Chen ym. 2014		poikkileikkaus	6346	L	Taiwan	H	44 koulua	264 ilmanäytettä	26	2	↑↑ 2	1	2
Choi ym. 2014		tapaus-verrokki	400	L	Ruotsi	H&I	390 kotia	388 pölynäytettä	9	1	0	8	1
Cox ym. 2022	19,29, 35	poikkileikkaus ja 5v prospekt. (CCAAPs)	170 (7v), 112 (12v)	L	US	H	178 kotia	170 pölynäytettä	7 + 15 000 (sieni- ja bakteerit ASV (fajit))	12	yht 7: ↑↑ 1, ↓↓ 4, ↑↑ &	2	8
Dales ym. 2006	7	prospekt 1v., syntymäk	332	L	Kanada	H	332 kotia	332 ilmanäytettä	1	0	-	1	6
Dales ym. 2010	6	prospekt 1v., syntymäk	357	L	Kanada	H	357 kotia	357 ilmanäytettä	4	1	0	1	1
Dannemiller ym. 2014		tapaus-verrokki, prospekt. 6v	41	L	US	H	41 kotia	41 pölynäytettä	3 + >100 sienten lajit, suvut ja luokat	6	↓↓ yksi	4-11	1
Dharmage ym. 2002		ECRHS 1v seuranta-aika	35	A	Australia	I	35 kotia	140 ilmanäytettä	2	0	-	3	1
Douwes ym. 1999		Tapaus-verrokki	60	L	Hollanti	H&I	60 kotia	n.60*3 pölynäytettä	1 x 3	1	0	1	1
Eiffert ym. 2016		Poikkileikkaus	153	A	USA	H&I	150 kotia	150 pölyn. (pyyhintä)	1	1	0	1	1
Fu ym. 2020	1,3,26, 27	Poikkileikkaus	309	L	Malesia	H	7 koulua	21 pölynäytettä	4+ 580 sukua	0	-	1	1
Fu ym. 2021	12, 26, 27	poikkileikkaus	308	L	Malesia	H	7 koulua	21 pölynäytettä	4+ 8 (+400) sukua	0	-	1	8
Garrett ym. 1998		poikkileikkaus, paneelitutkimus	148	L	Australia	H&I	80 kotia	6*80 ilmanäytettä	8	2	↑↑ 2	5	3
Gent ym. 2002		Prospekt. 6-12kk	819 / 880	L	US	I	819/880 kotia	819 ilmanäytettä	8	1	0	2	2
Holst ym. 2016		poikkileikkaus	330	L	Tanska	H&I	15 koulua, 317 kotia	21 ilma- ja 21+317 pölyn., 21 lask.pölyä	15	2	0	1	10
Hyvärinen ym. 2006		tapaus-verrokki (uusi astma)	72	L	Suomi	H	72 kotia	72 pölynäytettä (pölypussi)	10	1	0	14	1
Jacobs ym. 2014	1	poikkileikkaus	3843 / 2736	L	Espanja, Hollanti ja Suomi	H	8+11+6 koulua	25*2 pölynäytettä (EDC ja laatikot)	16	5	↓↓ 4	1	3-7
Johansson ym. 2013	5, 29, 35	poikkileikkaus (CCAAPs)	178 /158	L	USA	H	173 kotia	173 Pölynäytettä	4	0	-	2	1
Jones ym. 2011		tapaus-verrokki (astma)	99	L	USA	H&I	99 kotia	99+99 Ilmanäytettä	2	2	0	2	1
Juel Holst ym. 2020		poikkileikkaus	402	A	Tanska	I	402 kotia	402 pölynäytettä (EDC)	22	1	↑↑ 1	4	9
Li ym. 1997		poikkileikkaus	264	A	Taiwan	I	28 päiväk.	ilmanäytettä	6	0	-	5	16
Li & Hsu 1997		Tapaus-verrokki	92	L	Taiwan	I	92 Kotia	4*2 ilmanäytettä	5 X 2	2	↑↑ 1,	5	2
Maheswaran ym. 2014		Tapaus-verrokki, 4v. (SAGE)	584 / 422	L	Kanada	I+v	584 kotia	584 pölynäytettä	1	0	-	2	4
Moniruzzaman ym. 2012		Tapaus-verrokki (DBH)	400/ 390	L	Ruotsi	H	390 kotia	390 pölynäytettä	1 x 2	0	-	3	1
Nordbäck ym. 2016	12,13, 27	poikkileikkaus	462	L	Malesia	H	8 koulua	64*2 pölynäytettä (Petrimaljat, pyyhintä)	3 X 2	1	↑↑ 1	1	6
Norbäck ym. 2017	12,13, 26	poikkileikkaus	368	L	Malesia	H	8 koulua	64 pölynäytettä	4	0	-	1	6
Oluwole ym. 2017		tapaus-verrokki (astma)	197	L	Kanada	I	197 kotia	197*2 pölynäytettä	2	0	-	2	1
Reponen ym. 2011	5, 19, 35	poikkileikkaus+ prospekt. 6v	176	L	USA	H	176 kotia	176*2 pölynäytettä	1 x 2	1	↑↑ 1	2	1
Rosenbaum ym. 2010	31	AUDIT syntymäk. Prospekt. 9-12kk	103	L	USA	H	103 kotia	103*3 ilma- ja pölyn.	11	1	↑↑ 1	2	1
Rosenbaum ym. 2015	30	AUDIT syntymäk. Prospekt. 9-12kk	103	L	USA	H	84 kotia	84 pölynäytettä	1	1	0	3	1
Sharpe ym. 2015		poikkileikkaus (NHANES)	8 412	L+A	USA	I	8 303 kotia	9 353 pölynäytettä	1	0	-	1	3
Shorter ym. 2018		Tapaus-verrokki (uusi astma)	448	L	Uusi-Seelanti	H&I	299 kotia	299 pölynäytettä (EDC)	5	4	0	5	1
Simoni ym. 2011		poikkileikkaus (HESE)	654	L	5 Euroopan maata	H	21 koulua	46 ilma- ja pölyn.	5	2	↑↑ 2	2	6
Stark ym. 2003	5,19, 29	prospekt.8kk, syntymäk	499/ 419	L	USA	I	499 kotia	419 ilma- ja pölyn.	2	0	-	1	3
Strachan ym. 1990		poikkileikkaus	330 / 1000	L	UK	H&I	88 kotia	88*3 *4 ilmanäytettä	3 X 3	0	-	2	2
Tischer ym. 2015		prospekt. 8v., ECRHS II	956	A	10 Euroopan maata	H&I	956 kotia	956 pölynäytettä	7	4	↑↑ 1	8	3
Wan & Li 1999		poikkileikkaus	40+69	L	Taiwan	I	8+8 päiväk., toimisto	8+8 ilmanäytettä	4	2	↑↑ 1	4	10
Wickman ym. 1992		poikkileikkaus	175 /185	L	Ruotsi	I	175/ 185 kotia	175 pölynäytettä	1	0	-	2	3

Kv=kosteusvaurio, A/L= Tutkittavien joukko: aikuiset (A), lapset(L); H=Havaittu kv, I=itse-raportoitu kv, I+v=itse raportoitu ja vahvistettu näkyvä home; prospekt.=prospektiivinen, syntymäk.=syntymäkohortti; A=Montako mikrobia tutkittu vs. kv; B=Montako mikrobia positiivisesti yhteydessä kv; C=Montako kv mikrobia yhteydessä terveyteen; D=Montako kv-indikaattoria tutkittu; E=Montako terveyspäätetapahtumaa tutkittu. ↑↑ montako mikrobia lisäksi ja ↓↓ montako vähensi terveyspäätetaphtuman riskiä.

Lähteet

Adams RI, Leppänen H, Karvonen AM, Jacobs J, Borràs-Santos A, Valkonen M, Krop E, Haverinen-Shaughnessy U, Huttunen K, Zock JP, Hyvärinen A, Heederik D, Pekkanen J, Täubel M. Microbial exposures in moisture-damaged schools and associations with respiratory symptoms in students: A multi-country environmental exposure study. *Indoor Air*. 2021 Nov;31(6):1952-1966. <https://doi.org/10.1111/ina.12865>.

Annala, P., Hellemaa, M., Pakkala, T., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M. 2017. Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings. *Case Studies in Construction Materials*. Vol. 6. Pp. 103-108.

Annala, P. J., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., Vinha, J. 2018. Need to repair moisture and mould damage in different structures in Finnish public buildings. *Journal of Building Engineering*. Vol. 16. Pp. 72-78.

ANSI/ASHRAE, 2017. Standard 55-2017: thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.

ASHRAE 160. (2009). *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*. ANSI/ASHRAE Standard 160–2009. 16 p.

Behbod B, Sordillo JE, Hoffman EB, Datta S, Muilenberg ML, Scott JA, Chew GL, Platts-Mills TA, Schwartz J, Burge H, Gold DR. Wheeze in infancy: protection associated with yeasts in house dust contrasts with increased risk associated with yeasts in indoor air and other fungal taxa. *Allergy*. 2013 Nov;68(11):1410-8. <https://doi.org/10.1111/all.12254>.

Behbod B, Sordillo JE, Hoffman EB, Datta S, Webb TE, Kwan DL, Kamel JA, Muilenberg ML, Scott JA, Chew GL, Platts-Mills TA, Schwartz J, Coull B, Burge H, Gold DR. Asthma and allergy development: contrasting influences of yeasts and other fungal exposures. *Clin Exp Allergy*. 2015 Jan;45(1):154-63. <https://doi.org/10.1111/cea.12401>.

Caillaud D, Leynaert B, Keirsbulck M, Nadif R; mould ANSES working group. Indoor mould exposure, asthma and rhinitis: findings from systematic reviews and recent longitudinal studies. *Eur Respir Rev*. 2018 May 15;27(148):170137. <https://doi.org/10.1183/16000617.0137-2017>.

- Cedeño Laurent JG, Williams A, Oulhote Y, Zanobetti A, Allen JG, Spengler JD. Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. *PLoS Med* 2018;15(7):e1002605.
- Chen CH, Chao HJ, Chan CC, Chen BY, Guo YL. Current asthma in schoolchildren is related to fungal spores in classrooms. *Chest*. 2014 Jul;146(1):123-134. <https://doi.org/10.1378/chest.13-2129>.
- Cho SH, Reponen T, LeMasters G, Levin L, Huang J, Meklin T, Ryan P, Villareal M, Bernstein D. Mold damage in homes and wheezing in infants. *Ann Allergy Asthma Immunol*. 2006 Oct;97(4):539-45. [https://doi.org/10.1016/S1081-1206\(10\)60947-7](https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)60947-7).
- Choi H, Byrne S, Larsen LS, Sigsgaard T, Thorne PS, Larsson L, Sebastian A, Bornehag CG. Residential culturable fungi, (1-3, 1-6)- β -d-glucan, and ergosterol concentrations in dust are not associated with asthma, rhinitis, or eczema diagnoses in children. *Indoor Air*. 2014 Apr;24(2):158-70. <https://doi.org/10.1111/ina.12068>.
- CIBSE, 2015. Guide A: environmental design, eighth edition. Chartered Institution of Building Services Engineers, London.
- Cox J, Ryan P, Burkle J, Jandarov R, Mendell MJ, Hershey GK, LeMasters G, Reponen T. Quantitative and semiquantitative estimates of mold exposure in infancy and childhood respiratory health. *Environ Epidemiol*. 2020 Jun 19;4(4):e101. <https://doi.org/10.1097/EE9.000000000000101>.
- Cox J, Stone T, Ryan P, Burkle J, Jandarov R, Mendell MJ, Niemeier-Walsh C, Reponen T. Residential bacteria and fungi identified by high-throughput sequencing and childhood respiratory health. *Environ Res*. 2022 Mar;204(Pt D):112377. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112377>.
- Dales R, Miller D, Ruest K, Guay M, Judek S. Airborne endotoxin is associated with respiratory illness in the first 2 years of life. *Environ Health Perspect*. 2006 Apr;114(4):610-4. <https://doi.org/10.1289/ehp.8142>.
- Dales R, Ruest K, Guay M, Marro L, David Miller J. Residential fungal growth and incidence of acute respiratory illness during the first two years of life. *Environ Res*. 2010 Oct;110(7):692-8. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.07.007>.

Dannemiller KC, Mendell MJ, Macher JM, Kumagai K, Bradman A, Holland N, Harley K, Eskenazi B, Peccia J. Next-generation DNA sequencing reveals that low fungal diversity in house dust is associated with childhood asthma development. *Indoor Air*. 2014 Jun;24(3):236-47. <https://doi.org/10.1111/ina.12072>.

Dharmage S, Bailey M, Raven J, Abeyawickrama K, Cao D, Guest D, Rolland J, Forbes A, Thien F, Abramson M, Walters EH. Mouldy houses influence symptoms of asthma among atopic individuals. *Clin Exp Allergy*. 2002 May;32(5):714-20. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2222.2002.01371.x>.

de Donato FK, Leaone M, Scortichini M, de Sario M, et al. Katsouyanni K, Lanki T, ym. Changes in the effect of heat on mortality in the last 20 years in nine European cities. Results from the PHASE project. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2015, 12: 15567-15583.

Energiatollisuus ry. 2022. Kaukojäähdytystilasto. Saatavissa: <https://energia.fi/uutis-huone/materiaalipankki/kaukojaahdytystilasto.html#material-view>. (viitattu 21.11.2022)

Fanger PO. 1970. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. Malabar, FL: R.E. Krieger Pub. Co.

Douwes J, van der Sluis B, Doekes G, van Leusden F, Wijnands L, van Strien R, Verhoeff A, Brunekreef B. Fungal extracellular polysaccharides in house dust as a marker for exposure to fungi: relations with culturable fungi, reported home dampness, and respiratory symptoms. *J Allergy Clin Immunol*. 1999 Mar;103(3 Pt 1):494-500. [https://doi.org/10.1016/s0091-6749\(99\)70476-8](https://doi.org/10.1016/s0091-6749(99)70476-8).

Eiffert S, Noibi Y, Vesper S, Downs J, Fulk F, Wallace J, Pearson M, Winqvist A. A Citizen-Science Study Documents Environmental Exposures and Asthma Prevalence in Two Communities. *J Environ Public Health*. 2016;2016:1962901. <https://doi.org/10.1155/2016/1962901>. PMC5143781.

Emenius G, Svartengren M, Korsgaard J, Nordvall L, Pershagen G, Wickman M. Indoor exposures and recurrent wheezing in infants: a study in the BAMSE cohort. *Acta Paediatr*. 2004a Jul;93(7):899-905

Emenius G, Svartengren M, Korsgaard J, Nordvall L, Pershagen G, Wickman M. Building characteristics, indoor air quality and recurrent wheezing in very young children (BAMSE). *Indoor Air*. 2004b Feb;14(1):34-42. <https://doi.org/10.1046/j.1600-0668.2003.00207.x>.

FINVAC. 2019. Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen.

Saatavissa: https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas_asuinrakennusten_ilmanvaihdon_mitoitukseen_2019.pdf, (viitattu 10.10.2022)

FINVAC. 2020. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa.

Saatavissa: https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas_ilmanvaihdon_mitoitukseen_muissa_kuin_asuinrakennuksissa_2019b.pdf, (viitattu 10.10.2022)

Fu X, Norbäck D, Yuan Q, Li Y, Zhu X, Hashim JH, Hashim Z, Ali F, Zheng YW, Lai XX, Spangfort MD, Deng Y, Sun Y. Indoor microbiome, environmental characteristics and asthma among junior high school students in Johor Bahru, Malaysia. *Environ Int.* 2020 May;138:105664. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105664>.

Fu X, Norbäck D, Yuan Q, Li Y, Zhu X, Hashim JH, Hashim Z, Ali F, Hu Q, Deng Y, Sun Y. Association between indoor microbiome exposure and sick building syndrome (SBS) in junior high schools of Johor Bahru, Malaysia. *Sci Total Environ.* 2021 Jan 20;753:141904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141904>.

Garrett MH, Rayment PR, Hooper MA, Abramson MJ, Hooper BM. Indoor airborne fungal spores, house dampness and associations with environmental factors and respiratory health in children. *Clin Exp Allergy.* 1998 Apr;28(4):459-67. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2222.1998.00255.x>.

Gasparrini, A., Armstrong, B., Kenward, B.M., 2010. Distributed lag non-linear models. *Stat Med* 29(20): 2224–2234.

Gent JF, Ren P, Belanger K, Triche E, Bracken MB, Holford TR, Leaderer BP. Levels of household mold associated with respiratory symptoms in the first year of life in a cohort at risk for asthma. *Environ Health Perspect.* 2002 Dec;110(12):A781-6. <https://doi.org/10.1289/ehp.021100781>.

Hakanen, J. 2017. Ilmastonvaikutuksen vaikutus puuosien kuntoon. Kandidaatintyö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 37 s. + 1 liites.

Hansen A, Williamson T, Pisaniello D, Bennetts H, van Hoof J, Arakawa Martins L, Visvanathan R, Zuo J, Soebarto V. The Thermal Environment of Housing and Its Implications for the Health of Older People in South Australia: A Mixed-Methods Study. *Atmosphere* 2022, 13, 96.

Head K, Clarke M, Bailey M, Livinski A, Ludolph R, Singh A, 2018. Web Annex D. Report of the systematic review on the effect of indoor heat on health. In: WHO Housing and health guidelines. Geneva: World Health Organization; (WHO/CED/PHE/18.05).

Hedman L, Andersson M, Bjerg A, Forsberg B, Lundbäck B, Rönmark E. Environmental risk factors related to the incidence of wheeze and asthma in adolescence. *Clin Exp Allergy*. 2015 Jan;45(1):184-91. <https://doi.org/10.1111/cea.12335>.

Holst GJ, Høst A, Doekes G, Meyer HW, Madsen AM, Plesner KB, Sigsgaard T. Allergy and respiratory health effects of dampness and dampness-related agents in schools and homes: a cross-sectional study in Danish pupils. *Indoor Air*. 2016 Dec;26(6):880-891. <https://doi.org/10.1111/ina.12275>.

Hwang BF, Liu IP, Huang TP. Molds, parental atopy and pediatric incident asthma. *Indoor Air*. 2011 Dec;21(6):472-8. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00733.x>.

Hytönen, Y., Seppänen, M. 2009. Tehdään elementeistä. Suomalaisen betonielementti-rakentamisen historia. Jyväskylä. SBK-säätiö. 332 s.

Hyvärinen A, Sebastian A, Pekkanen J, Larsson L, Korppi M, Putus T, Nevalainen A. Characterizing microbial exposure with ergosterol, 3-hydroxy fatty acids, and viable microbes in house dust: determinants and association with childhood asthma. *Arch Environ Occup Health*. 2006 Jul-Aug;61(4):149-57. <https://doi.org/10.3200/AEOH.61.4.149-157>.

Ilmatieteen laitos. Ilmastokatsaus 7/2022.

Ilmatieteen laitos. Ilmasto-opas 2021.

Institute of Medicine I. Damp indoor spaces and health; committee on damp indoor spaces and health. 2004. https://irp-cdn.multiscreensite.com/562d25c6/files/uploaded/IOM_Damp-Indoor-Spaces-and-Health_2004_naysayer.pdf

Iossifova YY, Reponen T, Ryan PH, Levin L, Bernstein DI, Lockey JE, Hershey GK, Villareal M, LeMasters G. Mold exposure during infancy as a predictor of potential asthma development. *Ann Allergy Asthma Immunol*. 2009 Feb;102(2):131-7. [https://doi.org/10.1016/S1081-1206\(10\)60243-8](https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)60243-8).

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J.

Jaakkola JJ, Hwang BF, Jaakkola N. Home dampness and molds, parental atopy, and asthma in childhood: a six-year population-based cohort study. *Environ Health Perspect.* 2005 Mar;113(3):357-61. <https://doi.org/10.1289/ehp.7242>.

Jacobs J, Borràs-Santos A, Krop E, Täubel M, Leppänen H, Haverinen-Shaughnessy U, Pekkanen J, Hyvärinen A, Doekes G, Zock JP, Heederik D. Dampness, bacterial and fungal components in dust in primary schools and respiratory health in schoolchildren across Europe. *Occup Environ Med.* 2014 Oct;71(10):704-12. <https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102246>.

Jayaprakash B, Adams RI, Kirjavainen P, et al. Indoor microbiota in severely moisture damaged homes and the impact of interventions. *Microbiome.* 2017;5(1):138.

Johansson E, Reponen T, Vesper S, Levin L, Lockey J, Ryan P, Bernstein DI, Villareal M, Khurana Hershey GK, Schaffer C, Lemasters G. Microbial content of household dust associated with exhaled NO in asthmatic children. *Environ Int.* 2013 Sep;59:141-7. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.05.011>.

Jones R, Recer GM, Hwang SA, Lin S. Association between indoor mold and asthma among children in Buffalo, New York. *Indoor Air.* 2011 Apr;21(2):156-64. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00692.x>.

Juel Holst G, Pørneki A, Lindgreen J, Thuesen B, Bønløkke J, Hyvärinen A, Elholm G, Østergaard K, Loft S, Brooks C, Douwes J, Linneberg A, Sigsgaard T. Household dampness and microbial exposure related to allergy and respiratory health in Danish adults. *Eur Clin Respir J.* 2020 Jan 24;7(1):1706235. <https://doi.org/10.1080/20018525.2019.1706235>.

Juhola S, Lanki T, Meriläinen P, Kollanus, V, Groundstroem F, Käyhkö J, & Järvelä M. Sopeutumisen suuntaviivat ilmastopolitiikassa. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2020.

Jung C-C, Chen N-T, Hsia Y-F, Hsu N-Y, Su H-J. Influence of Indoor Temperature Exposure on Emergency Department Visits Due to Infectious and Non-Infectious Respiratory Diseases for Older People. *Int J Environ Res Public Health* 2021, 18, 5273.

Jung C-C, Hsia Y-F, Hsu N-Y, Wang Y-C, Su H-J. Cumulative effect of indoor temperature on cardiovascular disease-related emergency department visits among older adults in Taiwan. *Sci Total Environ* 2020, 731:138958.

Jylhä, K., Jokisalo, J., Ruosteenoja, K., Pilli-Sihvola, K., Kalamees, T., Seitola, T., Mäkelä, H., Hyvönen, R., Laapas, M. and Drebs, A. 2015. Energy demand for the heating and cooling of residential houses in Finland in a changing climate. *Energy and Buildings*. 99. Pp. 104-116.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Böök, H., Lindfors, A., Pirinen, P., Laapas, M., Mäkelä, A., 2020. Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2020:6. <https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361287>.

Kahma, K., Pellikka, H., Leinonen, K., Leijala, U. & Johansson, M. (2014). Pitkän aikavälin tulvariskit ja alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet Suomen rannikolla. Ilmatieteen laitos. 2014:6. Helsinki. 48 s.

Kalamees T., Jylhä K., Tietäväinen H., Jokisalo J., Ilomets S., Hyvönen R., Saku S. 2012. Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. *Energy and Buildings*, 47, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.031>

Karvonen AM, Hyvärinen A, Roponen M, Hoffmann M, Korppi M, Remes S, von Mutius E, Nevalainen A, Pekkanen J. Confirmed moisture damage at home, respiratory symptoms and atopy in early life: a birth-cohort study. *Pediatrics*. 2009 Aug;124(2):e329-38. <https://doi.org/10.1542/peds.2008-1590>.

Karvonen AM, Hyvärinen A, Korppi M, Haverinen-Shaughnessy U, Renz H, Pfefferle PI, Remes S, Genuneit J, Pekkanen J. Moisture damage and asthma: a birth cohort study. *Pediatrics*. 2015 Mar;135(3):e598-606. <https://doi.org/10.1542/peds.2014-1239>.

Kenny GP, Flouris AD, Yagouti A, Notley, SR. Towards establishing evidence-based guidelines on maximum indoor temperatures during hot weather in temperate continental climates. *Temperature* 2019, 6:1, 11-36. <https://doi.org/10.1080/23328940.2018.1456257>.

Kim S, Kim S-Y, Oh J, Chae Y, Park J, Kim D & Kim Y-M. Effects of the 2018 heat wave on health in the elderly: implications for adaptation strategies to climate change. *Environ Anal Health Toxicol* 2020, 35(4):e2020024.

Koljonen T, Soimakallio S, Asikainen A, Lanki T, ym. Energia- ja ilmastostrategian vaikutusarviot: yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017.

Kollanus V, Lanki T. 2000-luvun pitkittyneiden helleaaltojen kuolleisuusvaikutukset Suomessa. *Duodecim* 2014; 130:983–990.

Kollanus V. 2019. Viime kesän helleaalto lisäsi ikääntyneiden kuolleisuutta – helteisiin on hyvä varautua ajoissa. Tiedote. THL. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/-/viime-kesan-helleaalto-lisasi-ikaantyneiden-kuolleisuutta-helteisiin-on-hyva-varautua-ajoissa>

- Kollanus V, Tiittanen P, Lanki T. Mortality risk related to heatwaves in Finland – Factors affecting vulnerability. *Environ Res* 2021, 201:111503. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111503>
- Kollanus V., Halonen J. I., Meriläinen P., Lanki T. 2022. Helteen vaikutukset ja varautuminen perusterveydenhuollon ja erikoissairaanhoidon sairaaloissa. Työpaperi 27/2022. THL. Helsinki. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-877-4> (viitattu 1.10.2022)
- Koskinen P. 2021. Asuinkerrostalojen kaukojäähdytys. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto. Espoo.
- Kuntaliitto. 2012. Hulevesiopas. Suomen Kuntaliitto, Helsinki. ISBN 978-952-213-896-5. <https://www.kuntaliitto.fi/julkaisut/2012/1481-hulevesiopas>
- Kvande, T., Bakken, N., Bergheim, E., Thue, V. 2018. Durability of ETICS with Rendering in Norway—Experimental and Field Investigations. *Buildings* 2018, 8(7), 93; <https://doi.org/10.3390/buildings8070093>
- Kvande T., Lisø K.R. 2009. Climate adapted design of masonry structures. *Building and Environment*, 44, pp. 2442–2450.
- Käypä hoito. 2017. Kosteus- ja homevaurioista oireileva potilas (online). Suomalaisen Lääkäriseura Duodecimin asettama työryhmä. Helsinki: Suomalainen Lääkäriseura Duodecim. Saatavilla internetissä: <https://www.kaypahoito.fi/hoi50111>.
- Lahdensivu, J. 2010. Julkisivujen ja parvekkeiden kestävyys muuttuvassa ilmastossa. *Suomen Ympäristö 17 / 2010*, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 64 s.
- Lahdensivu, J. 2012. Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies. Tampere. Tampere University of Technology. Publication 1028. 117 p + app. 37 p.
- Lahdensivu, E. 2022. Betonielementtikerrostalojen julkisivujen ja parvekerakenteiden vaurioituminen 1990-luvun rakennustuotannossa. Tampere. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Diplomityö. 91 s.
- Laitinen, A. Tuominen, P. Holopainen, R. Tuomaala, P. Jokisalo, J. Eskola, L. Sirén, K. 2014. Renewable energy production of Finnish heat pumps. Final report of the SPF-project. VTT. 2014. Saatavissa <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2014/T164.pdf>

Laki tulvariskien hallinnasta 620/2010. Annettu Naantalissa 24 päivänä kesäkuuta 2010. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20100620>.

Larsson M, Hägerhed-Engman L, Moniruzzaman S, Janson S, Sundell J, Bornehag CG. Can we trust cross-sectional studies when studying the risk of moisture-related problems indoor for asthma in children? *Int J Environ Health Res*. 2011 Aug;21(4):237-47. <https://doi.org/10.1080/09603123.2010.533368>.

Laukkarinen, A., Jokela, T., Vinha, J., Pakkala, T., Lahdensivu, J., Lestinen, S., Jokisalo, J., Kosonen, R., Lindfors, A., Ruosteenoja, K., Jylhä, K. 2022. Vaipparakenteiden rakennusfysi-kaalisen toimivuuden ja huonetilojen kesäaikaisen jäähdytystehontarpeen mitoitusolo-suhteet – RAMI-hankkeen loppuraportti. Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Tutki-musraportti 3. Tampere. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2438-4>

Lehtonen, I., Ruosteenoja, K., Jylhä, K. 2014. Projected changes in European extreme precipitation indices on the basis of global and regional climate model ensembles. *International Journal of Climatology*, 34, 1208-1222, <https://doi.org/10.1002/joc.3758>

Leivo V, Kiviste M, Aaltonen A, Prasauskas T, Martuzevicius D, Haverinen-Saughnessy U, 2019. Analysis of hygrothermal parameters in Finnish and Lithuanian multi-familybuildings before and after energy retrofits. *Journal of Building Physics* Vol. 42(2). Pp. 441-457. <https://doi.org/10.1177/1744259118767236>.

Lemberg A-M, 2019. Eristerappausjärjestelmien vauriomekanismit ja kuntotutkimus-menetelmät. Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. Diplomityö. 144 s.

Li CS & Hsu LY. Airborne fungus allergen in association with residential characteristics in atopic and control children in a subtropical region. *Arch Environ Health*. 1997 Jan-Feb;52(1):72-9. <https://doi.org/10.1080/00039899709603804>.

Li CS, Hsu CW, Tai ML. Indoor pollution and sick building syndrome symptoms among workers in day-care centers. *Arch Environ Health*. 1997 May-Jun;52(3):200-7. <https://doi.org/10.1080/00039899709602887>.

Lisø, K.R. 2006. Building envelope performance assessments in harsh climates: Methods for geographically dependent design. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology. Doctoral Theses at NTNU 185. 187 p.

Maa- ja metsätalousministeriö, 2018. mmM nimesi merkittävät tulvariskialueet 2018–2024. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.7.2022] Saatavissa: <https://mmm.fi/-/mmm-nimesi-merkittavat-tulvariskialueet-vuosiksi-2018-2024>.

Maheswaran D, Zeng Y, Chan-Yeung M, Scott J, Osornio-Vargas A, Becker AB, Kozyrskyj AL. Exposure to Beta-(1,3)-D-glucan in house dust at age 7-10 is associated with airway hyperresponsiveness and atopic asthma by age 11-14. *PLoS One*. 2014 Jun 6;9(6):e98878. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098878>.

McConnell R, Berhane K, Gilliland F, Islam T, Gauderman WJ, London SJ, Avol E, Rappaport EB, Margolis HG, Peters JM. Indoor risk factors for asthma in a prospective study of adolescents. *Epidemiology*. 2002 May;13(3):288-95. <https://doi.org/10.1097/00001648-200205000-00009>.

Mendell MJ, Adams RI. The challenge for microbial measurements in buildings. *Indoor Air*. 2019 Jul;29(4):523-526. <https://doi.org/10.1111/ina.12550>.

Mendell MJ, Macher JM, Kumagai K. Measured moisture in buildings and adverse health effects: A review. *Indoor Air*. 2018 Jul;28(4):488-499. <https://doi.org/10.1111/ina.12464>.

Mendell MJ, Mirer AG, Cheung K, Tong M, Douwes J. Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: a review of the epidemiologic evidence. *Environ Health Perspect*. 2011 Jun;119(6):748-56. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002410>.

Milanzi EB, Koppelman GH, Smit HA, Wijga AH, Vonk JM, Brunekreef B, Gehring U. Role of timing of exposure to pets and dampness or mould on asthma and sensitization in adolescence. *Clin Exp Allergy*. 2019 Oct;49(10):1352-1361. <https://doi.org/10.1111/cea.13471>.

Moniruzzaman S, Hägerhed Engman L, James P, Sigsgaard T, Thorne PS, Sundell J, Bornehag CG. Levels of endotoxin in 390 Swedish homes: determinants and the risk for respiratory symptoms in children. *Int J Environ Health Res*. 2012;22(1):22-36. <https://doi.org/10.1080/09603123.2011.588322>.

Mäkelä, A., Lehtonen, I., Ruosteenoja, K., Tuomenvirta, H., Jylhä, K., Drebs, A. 2016. Ilmastonmuutos pääkaupunkiseudulla. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2016:8. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/170155>

Nafstad P, Oie L, Mehl R, Gaarder PI, Lødrup-Carlsen KC, Botten G, Magnus P, Jaakkola JJ. Residential dampness problems and symptoms and signs of bronchial obstruction in young Norwegian children. *Am J Respir Crit Care Med*. 1998 Feb;157(2):410-4. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.157.2.9706033>.

Neuvonen, P. 2006. Kerrostalot 1880-2000. Arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen. Helsinki. Rakennustieto Oy. 288 s.

Norbäck D, Hashim JH, Cai GH, Hashim Z, Ali F, Bloom E, Larsson L. Rhinitis, Ocular, Throat and Dermal Symptoms, Headache and Tiredness among Students in Schools from Johor Bahru, Malaysia: Associations with Fungal DNA and Mycotoxins in Classroom Dust. PLoS One. 2016 Feb 1;11(2):e0147996. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147996>.

Norbäck D, Hashim JH, Hashim Z, Cai GH, Sooria V, Ismail SA, Wieslander G. Respiratory symptoms and fractional exhaled nitric oxide (FeNO) among students in Penang, Malaysia in relation to signs of dampness at school and fungal DNA in school dust. Sci Total Environ. 2017 Jan 15;577:148-154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.148>.

Norbäck D, Zock JP, Plana E, Heinrich J, Svanes C, Sunyer J, Künzli N, Villani S, Olivieri M, Soon A, Jarvis D. Mould and dampness in dwelling places, and onset of asthma: the population-based cohort ECRHS. Occup Environ Med. 2013 May;70(5):325-31. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012-100963>.

Nyystilä, S., Palokangas, P. 2022. Tampereen kadut tulvivat öisten rankkasateiden jäljiltä – Ilmatieteen laitos: Tampereelle osui kaikista voimakkain sade. Aamulehti 24.8.2022. <https://www.aamulehti.fi/tampere/art-2000009023685.html>. Viitattu 19.9.2022.

O'Lenick CR, Baniassadi A, Michael R, Monaghan A, Boehnert J, Yu X, Mary H. Hayden MH, Wiedinmyer C, Zhang K, Crank PJ, Heusinger J, Hoel P, Sailor DJ, Wilhelmi OV. A Case-Crossover Analysis of Indoor Heat Exposure on Mortality and Hospitalizations among the Elderly in Houston, Texas. Environ Health Perspect 2020, 128(12):127007.

Oluwole O, Kirychuk SP, Lawson JA, Karunanayake C, Cockcroft DW, Willson PJ, Senthilselvan A, Rennie DC. Indoor mold levels and current asthma among school-aged children in Saskatchewan, Canada. Indoor Air. 2017 Mar;27(2):311-319. <https://doi.org/10.1111/ina.12304>.

Ormandy D, Ezratty V. Health and thermal comfort: from WHO guidance to housing strategies. Energy Policy 2012, 49: 116e21.

Øie L, Nafstad P, Botten G, Magnus P, Jaakkola JK. Ventilation in homes and bronchial obstruction in young children. Epidemiology. 1999 May;10(3):294-9. <https://doi.org/10.1097/00001648-199905000-00018>.

Pakkala, TA, 2020. Assessment of the Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University. PhD Thesis. Tampere University Dissertations 204. 98 pages. 23 app.

Pakkala TA, Lemberg AM, Lahdensivu J, Pentti M, 2016. Climate change effect on wind-driven rain on facades. Nordic Concrete Research. Publication no. 54. Pp. 31-49.

Parjanne A, Silander J, Tiitu M & Viinikka A, 2018. Suomen tulvariskit nyt ja tulevaisuudessa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 30:2018. Suomen ympäristökeskus (SYKE). 73 s. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/278893>.

Parjanne A & Huokuna M, 2014. Tulviin varautuminen rakentamisessa – Opas alimpien rakentamiskorkeuksien määrittämiseksi ranta-alueilla. Ympäristöopas 2014. Suomen ympäristökeskus. 75 s. Saatavissa: <https://www.syke.fi/julkaisut>.

Pekkanen J, Hyvärinen A, Haverinen-Shaughnessy U, Korppi M, Putus T, Nevalainen A. Moisture damage and childhood asthma: a population-based incident case-control study. Eur Respir J. 2007 Mar;29(3):509-15. <https://doi.org/10.1183/09031936.00040806>.

Pellikka H, Leijala U, Johansson M, Leinonen K & Kahma K. Future probabilities of coastal floods in Finland. Continental Shelf Research 2018, 157, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.02.006>.

Quansah R, Jaakkola MS, Hugg TT, Heikkinen SAM, Jaakkola JJK. Residential dampness and molds and the risk of developing asthma: a systematic review and meta-analysis. PLoS One. 2012;7(11):e47526. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047526>.

Reijula K, Ahonen G, Alenius H, Holopainen R, Lappalainen S, Palomäki E & Reiman, M, 2012. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012. Espoo. https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoimii/julkaisut/Documents/trvj_1+2012.pdf

Reponen T, Lockey J, Bernstein DI, Vesper SJ, Levin L, Khurana Hershey GK, Zheng S, Ryan P, Grinshpun SA, Villareal M, Lemasters G. Infant origins of childhood asthma associated with specific molds. J Allergy Clin Immunol. 2012 Sep;130(3):639-644.e5. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2012.05.030>.

Reponen T, Vesper S, Levin L, Johansson E, Ryan P, Burkle J, Grinshpun SA, Zheng S, Bernstein DI, Lockey J, Villareal M, Khurana Hershey GK, LeMasters G. High environmental relative moldiness index during infancy as a predictor of asthma at 7 years of age. Ann Allergy Asthma Immunol. 2011 Aug;107(2):120-6. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2011.04.018>.

RIL 107-2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 219 s.

Rosenbaum PF, Crawford JA, Anagnost SE, Wang CJ, Hunt A, Anbar RD, Hargrave TM, Hall EG, Liu CC, Abraham JL. Indoor airborne fungi and wheeze in the first year of life among a cohort of infants at risk for asthma. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2010 Sep;20(6):503-15. <https://doi.org/10.1038/jes.2009.27>.

Rosenbaum PF, Crawford JA, Hunt A, Vesper SJ, Abraham JL. Environmental relative moldiness index and associations with home characteristics and infant wheeze. *J Occup Environ Hyg*. 2015;12(1):29-36. <https://doi.org/10.1080/15459624.2014.933958>.

ROTI, 2021. Rakennetun omaisuuden tila -raportti. 48 s. www.roti.fi

Ruosteenoja, K., 2013. Maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuvia lämpötila- ja sademääräskenaarioita. Sektoritutkimusohjelman ilmastoskenaariot (SETUKLIM) 1.osahanke. Ilmatieteen laitos, Helsinki.

Ruosteenoja, K., Jylhä, K. 2021. Projected climate change in Finland during the 21st century calculated from CMIP6 model simulations. *Geophysica*, 56(1), 39–70. https://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2021_56_1_039_ruosteenoja.pdf

Ruosteenoja, K., Jylhä, K., Kämäräinen, M. 2016a. Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica*, 51, 17-50. http://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2016_51_1-2_017_ruosteenoja.pdf

Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Kämäräinen, M. 2016b. Projections for the duration and degree days of the thermal growing season in Europe derived from CMIP5 model output. *Int. J. Climatol.*, 36: 3039-3055. <https://doi.org/10.1002/joc.4535>

Rönmark E, Perzanowski M, Platts-Mills T, Lundbäck B. Incidence rates and risk factors for asthma among school children: a 2-year follow-up report from the obstructive lung disease in Northern Sweden (OLIN) studies. *Respir Med*. 2002 Dec;96(12):1006-13. <https://doi.org/10.1053/rmed.2002.1391>.

Salmela A. Kosteusvaurioiden yleisyys pientalojen riskirakenteissa. 2022. (5) Ympäristö ja terveys-lehti.

Scheffer, T.C. 1971. A Climate Index for Estimating Potential for Decay in Wood Structure above Ground, *Forest Prod J*, s. 25–31.

Schroer KT, Biagini Myers JM, Ryan PH, LeMasters GK, Bernstein DI, Villareal M, Lockey JE, Reponen T, Grinshpun S, Khurana Hershey GK. Associations between multiple environmental exposures and Glutathione S-Transferase P1 on persistent wheezing in a birth cohort. *J Pediatr*. 2009 Mar;154(3):401-8, 408.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2008.08.040>.

SFS-EN 16798-1. (2019). Rakennusten energiatehokkuus. Osa 1: Sisäympäristön lähtötiedot rakennusten energiatehokkuuden suunnitteluun ja arviointiin ottaen huomioon ilman laatu, lämpöolot, valaistus ja äänitekniset ominaisuudet. Moduuli M1-6. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki.

Sharpe RA, Thornton CR, Tyrrell J, Nikolaou V, Osborne NJ. Variable risk of atopic disease due to indoor fungal exposure in NHANES 2005-2006. *Clin Exp Allergy*. 2015 Oct;45(10):1566-78. <https://doi.org/10.1111/cea.12549>.

Shorter C, Crane J, Pierse N, Barnes P, Kang J, Wickens K, Douwes J, Stanley T, Täubel M, Hyvärinen A, Howden-Chapman P; Wellington Region General Practitioner Research Network. Indoor visible mold and mold odor are associated with new-onset childhood wheeze in a dose-dependent manner. *Indoor Air*. 2018 Jan;28(1):6-15. <https://doi.org/10.1111/ina.12413>.

Simoni M, Cai GH, Norback D, Annesi-Maesano I, Lavaud F, Sigsgaard T, Wieslander G, Nystad W, Canciani M, Viegi G, Sestini P. Total viable molds and fungal DNA in classrooms and association with respiratory health and pulmonary function of European schoolchildren. *Pediatr Allergy Immunol*. 2011 Dec;22(8):843-52. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3038.2011.01208.x>.

Sohail HB, Kollanus V, Tiittanen P, Schneider A, Lanki T. Heat, heatwaves and cardiorespiratory hospital admissions in Helsinki, Finland. *Int J Environ Res Public Health* 2020, 17(21), 7892.

Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö, 2015. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Asetus 545/2015. Helsinki.

Stark PC, Burge HA, Ryan LM, Milton DK, Gold DR. Fungal levels in the home and lower respiratory tract illnesses in the first year of life. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003 Jul 15;168(2):232-7. <https://doi.org/10.1164/rccm.200207-730OC>. Epub 2003 Apr 30.

Strachan DP, Flannigan B, McCabe EM, McGarry F. Quantification of airborne moulds in the homes of children with and without wheeze. *Thorax*. 1990 May;45(5):382-7. <https://doi.org/10.1136/thx.45.5.382>.

SULPU ry. 2022. Tiedotteet. Saatavissa: <https://www.sulpu.fi/tiedotteet/> (viitattu 24.10.2022)

Suomalainen homemalli, 2018. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>, (viitattu 9.9.2022).

Suomen ympäristökeskus (SYKE) & ELY-keskukset, 2020. Kuvaus tulvakarttojen tarkistamisesta Suomessa vuonna 2019. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/i9/fi/trhs/tulvakarttojen_tarkistaminen_suomessa_vuonna_2019.pdf.

Teyton A, Tremblay M, Tardif I, Lemieux M-A, Nour K & Benmarhnia B. A Longitudinal Study on the Impact of Indoor Temperature on Heat-Related Symptoms in Older Adults Living in Non-Air-Conditioned Households. *Environ Health Perspect* 2022, 130(7): 77003.

Thacher JD, Gruzjeva O, Pershagen G, Melén E, Lorentzen JC, Kull I, Bergström A. Mold and dampness exposure and allergic outcomes from birth to adolescence: data from the BAMSE cohort. *Allergy*. 2017 Jun;72(6):967-974. <https://doi.org/10.1111/all.13102>.

Tham S, Thompson R, Landeg O, Murray KA, Waite T. Indoor temperature and health: a global systematic review. *Public Health* 2020, 179, 9–17.

Tilastokeskus, 2022. Rakennukset ja kesämökit, [viitattu 1.2.2022]

Tischer C, Chen CM, Heinrich J. Association between domestic mould and mould components, and asthma and allergy in children: a systematic review. *Eur Respir J*. 2011 Oct;38(4):812-24. <https://doi.org/10.1183/09031936.00184010>.

Tischer CG, Hohmann C, Thiering E, Herbarth O, Müller A, Henderson J, Granel R, Fantini MP, Luciano L, Bergström A, Kull I, Link E, von Berg A, Kuehni CE, Strippoli MP, Gehring U, Wijga A, Eller E, Bindeslev-Jensen C, Keil T, Heinrich J; ENRIECO consortium. Meta-analysis of mould and dampness exposure on asthma and allergy in eight European birth cohorts: an ENRIECO initiative. *Allergy*. 2011 Dec;66(12):1570-9. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2011.02712.x>.

Tischer C, Zock JP, Valkonen M, Doekes G, Guerra S, Heederik D, Jarvis D, Norbäck D, Olivieri M, Sunyer J, Svanes C, Täubel M, Thiering E, Verlato G, Hyvärinen A, Heinrich J. Predictors of microbial agents in dust and respiratory health in the Ecrhs. *BMC Pulm Med*. 2015 May 2;15:48. <https://doi.org/10.1186/s12890-015-0042-y>.

Toivonen, E., Partanen, A-I., Jylhä, K. 2021. Ilmastonmuutos vaikuttaa hulevesien mitoitukseen Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. *Vesitalous* 2/2021, s. 14–18.

Tulvakeskus. 2022. Tulvakarttapalvelu. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.7.2022]. Saatavissa: <https://paikkatieto.ymparisto.fi/tulvakartat/Viewer/Viewer.html?configBase=https://paikkatieto.ymparisto.fi/Geocortex/Essentials/REST/sites/Tulvakarttapalvelu/viewers/HTML5/virtualdirectory/Resources/Config/Default/>.

Tuomenvirta, H., Haavisto, R., Hildén, M., Lanki, T., Luhtala, S., Meriläinen, P., Mäkinen, K., Parjanne, A., Peltonen-Sainio, P., Pilli-Sihvola, K., Pöyry, J., Sorvali, J., Veijalainen, N. 2018. Sää- ja ilmatoriskit Suomessa – Kansallinen Arvio. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 43. 107 s.

Uejio CK, Patel Joiner A, Gonsoroski E, Tamerius JD, Jung J, Moran TP, Yancey AH. The association of indoor heat exposure with diabetes and respiratory 9-1-1 calls through emergency medical dispatch and services documentation. *Environ Res* 2022, 212: 113271.

Uejio CK, Tamerius JD, Vredenburg J, Asaeda G, Isaacs DA, Braun J, Quinn A, Freese JP. Summer indoor heat exposure and respiratory and cardiovascular distress calls in New York City, NY, U.S. *Indoor Air* 2016, 26: 594–604.

Valvira, 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 1. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto, ohje 8/2016, Helsinki.

Veijalainen, N., Jakkila, J., Nurmi, T., Vehviläinen, B., Marttunen, M. & Aaltonen, J. (2012). Suomen vesivarat ja ilmastonmuutos – vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen. WaterAdapt-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 16:2012. Suomen ympäristökeskus (SYKE). 138 s. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38789>.

Velashjerdi Farahani, A. V., Jokisalo, J., Korhonen, N., Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Kosonen, R. 2021a. Overheating Risk and Energy Demand of Nordic Old and New Apartment Buildings during Average and Extreme Weather Conditions under a Changing Climate. *Applied Sciences*. 11. 3972. <https://doi.org/10.3390/app11093972>.

Velashjerdi Farahani, A. V., Jokisalo, J., Korhonen, N., Kosonen, R. 2021b. Indoor temperature conditions and energy demand of a Finnish detached house in a changing climate. *Proceedings of Cold Climate Conference 2021*.

Velashjerdi Farahani, A. V., Jokisalo, J., Korhonen, N., Jylhä, K., Kosonen R., Lestinen, S. 2022. Performance assessment of ventilative and radiant cooling systems in office buildings during extreme weather conditions under a changing climate. *Journal of Building Engineering*. 57. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104951>

Vesi. 2021. Tulvariskialueet. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.7.2022] Saatavissa: <https://www.vesi.fi/vesitieto/tulvariskialueet/>.

Vihmo, J. 2021. Suhdannekatsaus maaliskuu 2021. Rakennusteollisuus RT. Suhdannekatsaukset. 8 s.

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A., Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, tutkimusraportti 159. 354 s. + 43 liites.

Wan GH & Li CS. Indoor endotoxin and glucan in association with airway inflammation and systemic symptoms. Arch Environ Health. 1999 May-Jun;54(3):172-9. <https://doi.org/10.1080/00039899909602256>.

Wang J, Pindus M, Janson C, Sigsgaard T, Kim JL, Holm M, Sommar J, Orru H, Gislason T, Johannessen A, Bertelsen RJ, Norbäck D. Dampness, mould, onset and remission of adult respiratory symptoms, asthma and rhinitis. Eur Respir J. 2019 May 23;53(5):1801921. <https://doi.org/10.1183/13993003.01921-2018>.

Wen HJ, Chiang TL, Lin SJ, Guo YL. Predicting risk for childhood asthma by pre-pregnancy, perinatal, and postnatal factors. Pediatr Allergy Immunol. 2015 May;26(3):272-279. <https://doi.org/10.1111/pai.12374>.

Wickman M, Gravesen S, Nordvall SL, Pershagen G, Sundell J. Indoor viable dust-bound microfungi in relation to residential characteristics, living habits, and symptoms in atopic and control children. J Allergy Clin Immunol. 1992 Mar;89(3):752-9. [https://doi.org/10.1016/0091-6749\(92\)90384-e](https://doi.org/10.1016/0091-6749(92)90384-e).

Wickman M, Melén E, Berglind N, Lennart Nordvall S, Almqvist C, Kull I, Svartengren M, Pershagen G. Strategies for preventing wheezing and asthma in small children. Allergy. 2003 Aug;58(8):742-7. <https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.2003.00078.x>.

World Health Organization (WHO), 1984. The Effects of the Indoor Housing Climate on the Health of the Elderly: Report on a WHO Working Group. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen.

World Health Organization (WHO), 1987. Health Impact of Low Indoor Temperatures: Report on a WHO Meeting. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen.

World Health Organization (WHO), 1990. Indoor Environment: Health Aspects of Air Quality, Thermal Environment, Light and Noise. World Health Organization, Geneva.

World Health Organization (WHO), 2009. WHO guidelines for indoor air quality: Dampness and mold. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43325/E92645.pdf

World Health Organization (WHO), 2011. Public health advice on preventing health effects of heat – new and updated information for different audiences. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen.

WHO (World Health Organization), 2018. WHO Housing and health guidelines. World Health Organization, Geneva.

WHO (World Health Organization), 2021. Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

Williams AA, Spengler JD, Catalano P, Allen JG, Cedeno-Laurent JG. Building Vulnerability in a Changing Climate: Indoor Temperature Exposures and Health Outcomes in Older Adults Living in Public Housing during an Extreme Heat Event in Cambridge, MA. *Int J Environ Res Public Health* 2019, 16, 2373.

Ympäristöministeriö, 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energia-
tehokkuudesta. Asetus 1010/2017. Helsinki.

tietokayttoon.fi

ISBN PDF 978-952-383-278-7

ISSN PDF 2342-6799