



Ulkoilman hiukkasten kulkeutuminen rakennukseen – Interventio sisäilman laadun parantamiseksi

Kirjoittajat: Inga Ehder-Gahm
Arto Säämänen
Mikko Kultanen

Luottamuksellisuus: VTT Confidential

Versio: 21.10.2025

Raportin nimi Ulkoilman hiukkasten kulkeutuminen rakennukseen – Interventio sisäilman laadun parantamiseksi	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Velco Oy Laura Hamppula Konalantie 47 F 00390 HELSINKI Cervi Oy Jan Nyman Lampputie 4 00750 HELSINKI	Asiakkaan viite VTT-237433-25 VTT-237436-25
Projektin nimi VEENCE-interventio	Projektin numero/lyhytnimi 142186 / 142166
Tiivistelmä Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten tuloilman reitti ja sisäilman laatuun perustuva ilmanvaihdon säätö vaikuttavat asuntojen sisäilman laatuun, kuten ulkoilman hiukkasten kulkeutumiseen sisäilmaan. Tutkimuksen taustalla on huoli ilmansaasteiden ja puutteellisen korvausilman reitin vaikutuksesta ihmisten terveyteen. Tutkimus toteutettiin interventiona asiakkaan järjestämässä rivitaloasunnossa, jossa oli lähtötilanteessa koneellinen poistoilmanvaihto ja puutteellinen korvausilman reitti. Interventiossa tilannetta parannettiin asentamalla asiakkaan toimesta asuntoon korvausilmaventtiilit, jotka oli varustettu pienhiukkasia suodattavilla suodattimilla. Korvausilmaventtiilien asennuksen jälkeen karmiventtiilit eivät olleet käytössä. Erilaisia mittausasetelmia korvausilman reitille oli tutkimuksessa neljä: lähtötilanne (ei selkeää reittiä, karmiventtiilit tiiviisti kiinni), karmiventtiilit, korvausilmaventtiilit ilman suodattimia ja korvausilmaventtiilit suodattimilla. Asuntoon asennettiin myös asiakkaan toimesta itseoppiva ilmanvaihdon säätöyksikkö Sensor. Laitteen toteuttamaa poistoilmavirran tarpeenmukaista säätöä kokeiltiin simuloimalla henkilöiden tuottamaa hiilidioksidi- ja lämpökuormaa asunnon yhdessä huoneessa. Tulokset osoittivat, että riittävän korvausilman reitin ja tehokkaan ilmansuodatuksen avulla voidaan selvästi vähentää haitallisten hiukkasten ja muiden epäpuhtauksien pääsyä sisäilmaan. Korvausilmaventtiilien käyttö pienensi vaipan yli olevaa paine-eroa ja vähensi altistumista radonille. Sensor-ohjattu ilmanvaihto reagoi kuormituksen muutoksiin, ja kokeissa se piti hiilidioksidipitoisuuden alemmalla tasolla kuin vakiopoistolla, vaikka keskimääräinen poistoilmavirta oli pienempi. Tutkimuksen perusteella suositellaan, että asuinrakennuksissa hyödynnetään suodattimellisia korvausilmaventtiilejä. Suodattimien hiukkaserotusaste tulee olla osoitettu riittäväksi. Sensor-järjestelmällä ohjattu ilmanvaihto mukautuu huoneiston henkilömäärän mukaan ja sen käyttö tarjoaa potentiaalia energiatehokkaaseen ilmanvaihtoon.	
Tampere 21.10.2025 Laatija Inga Ehder-Gahm, Senior Scientist	Tarkastaja Hannu Salmela, Research Team Leader
Confidentiality VTT Confidential	
VTT:n yhteystiedot Visiokatu 4, 33720 Tampere, Inga.Ehder-Gahm@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Asiakkaat: Velco Oy 1 kopio, Cervi Oy 1 kopio VTT:n arkisto: 1 kopio	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Hyväksyminen

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä:

21.10.2025

Allekirjoitus:

DocuSigned by:
Hannu Salmela
7ADE18D09ECD43C...

Nimi:

Hannu Salmela

Asema:

Research Team Leader

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	4
2.	Tutkimuskohde.....	4
3.	Mittausasetelmat	5
3.1	Korvausilmareitit	5
3.2	Itseoppiva ilmanvaihdon säätöyksikkö Senser	6
4.	Mittausmenetelmät	7
4.1	Asunnon ilmamäärät	8
4.2	Asunnon ilmatiiviys	8
4.3	Rakenteen vuodot	9
4.4	Hiukkasmittaukset	9
4.5	Paine-ero asunnon vaipan yli	9
4.6	Lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus	9
4.7	Radonmittaukset	10
4.8	Hiilidioksidipitoisuuden mittaukset Senser-laitteen tarkastelussa	10
5.	Tulokset	11
5.1	Poistoilmavirrat, ilmatiiviys ja rakenteen vuodot	11
5.2	Ulkoilman hiukkasten kulkeutuminen sisätiloihin	12
5.3	Paine-ero asunnon vaipan yli	13
5.4	Lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus	14
5.5	Radonpitoisuus	16
5.6	Ilmanvaihdon säätöyksikkö Senserin toiminta	16
6.	Tulosten tarkastelu	19
7.	Johtopäätökset.....	20
8.	Lähdeviitteet.....	20

1. Johdanto

Ilmansaasteet on tunnistettu vakavimmaksi ympäristöuhaksi ihmisten terveydelle [1]. Ilmansaasteille altistumisen arvioidaan aiheuttavan vuosittain maailmanlaajuisesti miljoonia kuolemantapauksia ja menetettyjä terveitä elinvuosia. Ulkoilman hiukkaspitoisuudet aiheuttavat merkittävän tautitaakan myös Suomessa. Arviolta menetetään noin 30 000 haittapainotettua elinvuotta vuosittain [1]. Pienhiukkaset voivat tunkeutua syvälle hengityselimiin ja niiden epäillään aiheuttavan erilaisia terveysongelmia, kuten hengityselin-, sydän- ja verisuonitauteja.

Koska ihmiset viettävät yli 90 % ajastaan sisätiloissa, tapahtuu ilmansaasteille altistuminen pääasiassa sisätiloissa. Siksi tarvitaan ymmärrystä rakennusten vaipan ja ilmanvaihdon toiminnasta ulkoilman epäpuhtauksien suhteen. Tämän tutkimuksen tavoitteena olikin selvittää, miten korvausilman reitti vaikuttaa sisäilman laatuun, kuten hiukkaspitoisuuksiin. Tyhjillään olleessa poistoilmanvaihdon varustetussa rivitaloasunnossa tehtiin neliosainen mittauskampanja, jossa korvausilman reittiä ja ilmansuodatusta muunneltiin. Asuntoon asennettiin korvausilmaventtiilit, joissa oli pienhiukkasia suodattavat suodattimet, sekä itseoppiva ilmanvaihdon säätöyksikkö. Korvausilmalla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa huonetilaan tulevaa ulkoilmaa, joka alipaineen vaikutuksesta korvaa poistoilman. Uudisrakentamisen yhteydessä sekä karmi- että korvausilmaventtiileistä käytetään nykyään yleisnimitystä tuloilmaventtiili.

2. Tutkimuskohde

Tutkimuskohteena oli vuonna 1991 rakennettu yksikerroksinen rivitalokaksio Vantaan Länsimäessä (Kuva 1). Asunnon pinta-ala oli 63 m², huonekorkeus 240 cm, ja pohjaratkaisu koostui kahdesta huoneesta, keittiöstä ja saunasta. Tutkimushetkellä asunto oli kalustamaton eikä siellä ollut asukkaita. Rakennus oli betonirakenteinen ja varustettu vesikeskuslämmityksellä. Asunto sijaitsi vilkasliikenteisen Porvoonväylän läheisyydessä.

Ilmanvaihto perustui asuntokohtaiseen koneelliseen poistojärjestelmään, jossa poistoilma johdettiin ulos huippuimurilla. Huippuimurin toimintaa säädettiin liesikuvusta. Kanavisto haarautui kolmeen osaan: liesikupuun, kylpyhuoneeseen ja saunaan. Intervention aikana saunan poistoilmaventtiili suljettiin tiiviisti mittausasetelman yksinkertaistamiseksi. Korvausilman sisäänotto oli suunniteltu tapahtuvaksi karmiventtiilien kautta, mutta tutkimusajankohtana asunnon edellinen asukas oli teipannut kaikki karmiventtiilit kiinni, mikä esti suunnitellun korvausilman saannin. Tässä tilanteessa korvausilma tuli asuntoon rakenteiden raoista.



Kuva 1. Kohdeasunto.

3. Mittausasetelmat

Asunnossa suoritettiin mittauksia kahdessa eri asetelmassa: 1) korvausilman reitin vaikutusten arviointi sekä 2) itseoppivan ilmanvaihdon säätöyksikkö Senserin toiminnan tarkastelu.

3.1 Korvausilmareitit

Interventiossa asuntoon asennettiin korvausilmaventtiilit, joissa oli pienhiukkasia suodattavat elektreettisuodattimet eli sähköisesti varatut suodattimet (Kuva 2). Korvausilmaventtiilien asennuksen jälkeen karmiventtiilit (Kuva 3) eivät olleet enää käytössä. Tutkimukset tehtiin alkutilanteesta sekä toteutettujen muutosten jälkeen. Erilaisia mittausasetelmia korvausilman reitille oli neljä:

1. lähtötilanteessa karmiventtiilit tiiviisti suljettuina
2. karkeasuodattimella varustetut ikkunoiden omat karmiventtiilit käytössä, leveys 40 cm / venttiili, yht. 4 kpl (suunniteltu ilmanjako)
3. korvausilmaventtiilit (Velco VLR-125, 3 kpl, ja VLR-80, 1 kpl) ilman suodattimia, avaus 2,5 cm (parannettu korvausilman reitti)
4. korvausilmaventtiilit elektreettisuodattimilla (Velco VS-125, 3 kpl, ja VS-80, 1 kpl), avaus 2,5 cm (korvausilman suodatuksen vaikutus).



Kuva 2. Velco-korvausilmaventtiili ja suodatin.



Kuva 3. Kohdeasunnossa olleet karmiventtiilit ja niiden karkeasuodatin.

Tutkimustapaukset ja niiden toteutusajankohdat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Mittausasetelmat ja niiden ajankohta.

Mittausasetelma	Koeaika pvm, alku	Koeaika pvm, loppu	Koetilanteen pituus [vrk]
Karmiventtiilit tiiviisti suljettuna	3.4.2025	8.4.2025	6
Karmiventtiilit auki	10.4.2025	21.4.2025	12
Uudet korvausilmaventtiilit ilman suodatinta	24.4.2025	1.5.2025	8
Uudet korvausilmaventtiilit suodattimilla	6.5.2025	14.5.2025	9

3.2 Itseoppiva ilmanvaihdon säätöyksikkö Sensor

Itseoppivan ilmanvaihdon säätöyksikkö Sensor (valmistaja Entos Oy) (Kuva 4) asennettiin ohjaamaan asunnon huippuimuria sen ilmanlaatuantureiden mittauksien perusteella. Säätöyksikön toiminta perustui ilman epäpuhtauksien, kuten hiilidioksidin (CO₂), lämpötilan ja kosteuden, määrään. Näin poistoilmavirta vaihteli automaattisesti sisäilman laadun mukaan tarpeenmukaisesti. Asunnon huippuimuri asetettiin käsiohjauksella maksiminopeudelle, jotta Sensor-säätöyksikkö pystyi tarvittaessa hyödyntämään sen koko kapasiteetin. Poistoilmavirta ei kuitenkaan koskaan pysähtynyt kokonaan, sillä automaattiohjauksessa oli määritelty minimivirta, joka oli 22 l/s.



Kuva 4. Itseoppiva ilmanvaihdon säätöyksikkö Sensor.

Sensor-säätöyksikön kokeiluissa hyödynnettiin erilaisia henkilömäärä- ja kuormitusvaihtoehtoja. Kokeet toteutettiin kolmessa eri kokoonpanossa: Sensor -ohjausta kokeiltiin 1) kahden tai 2) kuuden henkilön lämpö- ja hiilidioksidipäästöä vastaavalla kuormalla. Vertailutilanteena käytettiin kahden henkilön kuormaa, jolloin Sensor-ohjauksen sijaan käytettiin 3) vakiopoistoilmavirtaa.

Kuormat tuotettiin tutkimustilan olohuoneeseen (OH) sijoitetuilla lämmitettävillä sylinterimäisillä henkilösimulaattoreilla (Kuva 5). Kussakin kokeessa hiilidioksidipäästö tuotettiin sekoittamalla määritelty määrä CO₂:ta ilmavirtaan, jonka tilavuus oli 6 l/min henkilöä kohden. Päästö tapahtui henkilösimulaattorisylinterin yläreunasta 1,2 m korkeudelta. Kahden henkilön testissä CO₂:n päästö oli 14,2 l/h/hlö ja lämpökuorma 2 × 80 W eli yhteensä 160 W. Kuuden henkilön testissä CO₂:n päästö oli 19,9 l/h/hlö ja lämpökuorma 6 × 94,5 W (567 W). Kahden henkilön vakiopoistotestissä CO₂:n päästö oli 19,9 l/h/hlö ja lämpökuorma 2 × 94,5 W (378 W). Kaikissa tapauksissa kokeet toteutettiin

siten, että simulaattorit olivat päällä 6 tuntia ja pois päältä seuraavat 6 tuntia, alkaen klo 18:00 ensimmäisenä mittauspäivänä. Vakiopoistokokeessa poistoilmanvaihto pidettiin tasaisena 36,5 l/s teholla.

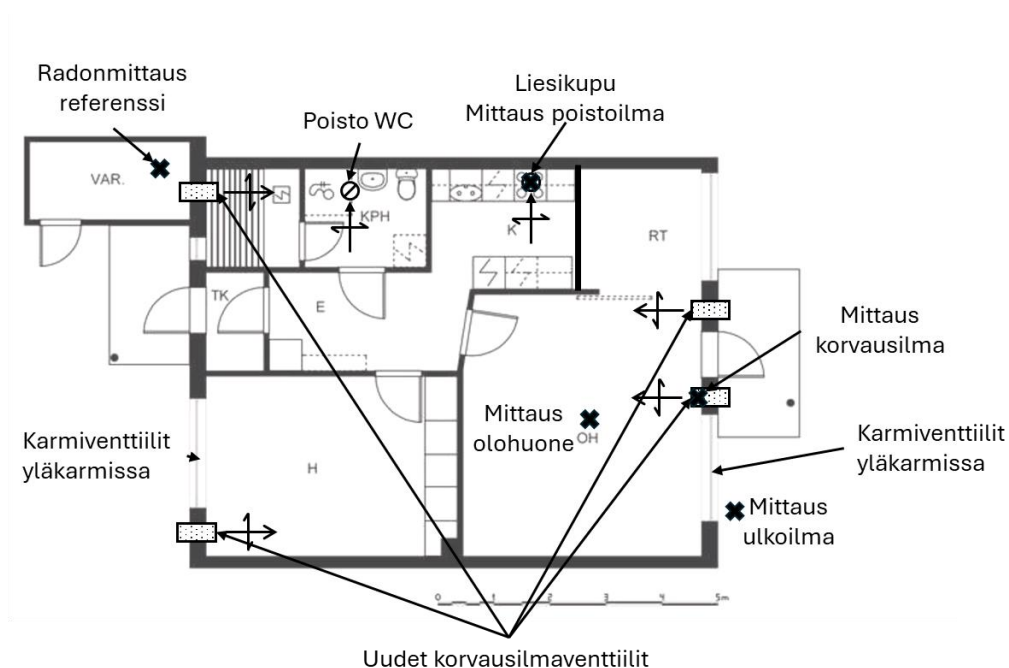


Hiilidioksidipäästö

Kuva 5. Henkilösimulaattorit asennettuna olohuoneeseen.

4. Mittausmenetelmät

Asunnossa tehtiin mittauksia, joilla selvitettiin erilaisten tuloilman reitin mittausasetelmien vaikutusta ilman hiukkaspitoisuuteen, lämpö- ja kosteusolosuhteisiin, radonin määrään sisäilmassa ja vaipan yli vallitsevaan paine-eroon. Kunkin eri mittausasetelman aikainen poistoilmavirtaama mitattiin, ja määritettiin asunnon tiiviys ja vaipan vuotokohdat. Tutkimuskohteen pohjapiirros, korvausilman reitit eri tilanteissa sekä mittauspisteiden sijainti kohteessa esitetään kuvassa 6.



Kuva 6. Tutkimuskohteen pohjapiirros, korvausilman reitit eri tilanteissa sekä mittauspisteiden sijainti kohteessa.

4.1 Asunnon ilmamäärät

Asunnon poistoilmavirtaamaa mitattiin jatkuvatoimisesti suihkutilan poistoilmaventtiilin paine-eromittauksen perusteella. Paine-erolähtetimen (Produal PEL) mittausarvot tallennettiin 10 sekunnin mittavälein tiedonkeruulaitteistoon. Jatkuvatoimisen mittauksen tulokset varmennettiin tekemällä hetkellisiä virtaamamittauksia kokonaispoistokanavasta ennen poistopuhallinta kuumailmalanka-anemometrillä (TSI/Airflow TA440).

4.2 Asunnon ilmatiiviys

Asunnon ilmatiiviys mitattiin standardin SFS-EN 13829 mukaisella ns. paine-eromenetelmällä. Tutkittavaan asuntoon eli vaipan rajaamiin asuintiloihin aiheutettiin eri suuruisia paine-eroja ulkoilmaan nähden ulko-oven paikalle asennettavan puhaltimen avulla, ja paine-eron ylläpitämiseen tarvittava, ovipuhaltimen läpi virtaava ilmamäärä (Q_{50} , [m^3/h]) mitattiin vuotokäyrän määrittämiseksi (Kuva 7). Vuotokäyrä määritettiin välille $-50 \dots +50$ Pa. Kaikki asunnon tarkoituksenmukaiset ilmapuotoaukot, kuten mm. ilmanvaihtokanavat, tiivistettiin. Mitatusta ilmamäärästä määritettiin ilmanvuotoluku (n_{50} , [$1/\text{h}$]) jakamalla mitattu ilmamäärä tutkittavan asunnon sisätilavuudella (V , [m^3]), joka oli 150 m^3 (1).

$$n_{50} = Q_{50} / V \quad (1)$$

Vastaavasti laskettiin ilmanvuotoluku (q_{50} , [m^3/hm^2]) jakamalla mitattu ilmamäärä (Q_{50} , [m^3/h]) rakennuksen ulkovaipan alalla (A , [m^2]), joka oli 203 m^2 (2). Ilmanvuotoluku q_{50} kuvaa rakennuksen vaipan ilmatiiveyttä. Se ilmaisee, kuinka paljon ilmaa (kuutiometreinä tunnissa) pääsee vuotamaan yhden neliömetrin kokoisen vaippa-alan läpi, kun rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välinen paine-ero on 50 pascalia.

$$q_{50} = Q_{50} / A \quad (2)$$



Kuva 7. Ilmatiiviuden mittaus paine-eromenetelmällä.

Asunnon ilmatiiviys mitattiin kaikilla neljällä eri mittausasetelmalla: lähtötilanne (ei selkeää reittiä, karmiventtiilit tiiviisti kiinni), karmiventtiilit auki, korvausilmaventtiilit käytössä ilman suodattimia ja korvausilmaventtiilit käytössä suodattimilla.

4.3 Rakenteen vuodot

Rakenteen vuotokohdat määritettiin merkkisavun avulla standardin SFS-EN ISO 9972:2015 liitteen E mukaisesti. Asuntoon tuotettiin alipaine käyttämällä tiiviysmittauksen ovipuhallinta. Savua tuotettiin visualisoimaan ilmavirtausta asunnon vaipan, ikkunankarmien, sähköpistorasioiden jne. läpi ja havaitsemaan vuotojen sijainnit.

4.4 Hiukkasmittaukset

Ilman hiukkaspitoisuuksia mitattiin Fidas Frog -optisella hiukkaslaskurilla (OPC) (Palas GmbH, Saksa). Laskuri oli kytketty nelikanavaiseen venttiiliohjaukseen, joka mahdollisti jaksottaisen näytteenoton ulkoilmasta, huoneiston poistoilmasta sekä olohuoneen keskeltä hengityskorkeudelta tai vaihtoehtoisesti korvausilmaventtiilistä hiukkassuodattimen jälkeen (kuva 3). Neljäntenä mittauspisteinä oli HEPA-suodatettu nollailmamittaus. Mittaus sykli koostui huuhteluajasta (120 s) ja näyteajasta (56 s), jolta ajalta pitoisuuden keskiarvo tallennettiin. Yhden näytekierron (neljä näytepistettä) pituus oli noin 11 minuuttia 45 sekuntia.

Ulkoilman hiukkasten kulkeutumista sisätiloihin arvioidaan tavallisesti infiltraatiokertoimen (F_{inf}) ja I/O-suhteen avulla (3). Rakennuksen infiltraatiokertoimen oletetaan olevan yhtä suuri kuin tasapainotilanteen I/O-suhde, mikäli sisäilmassa ei ole päästölähteitä. Koska sisäilman pitoisuus ei seuraa välittömästi ulkoilman pitoisuutta ilmanvaihdon aikavakiosta johtuen, voi I/O-suhde hetkittäin olla kaukana tasapainotilasta. Kun ulkoilman pitoisuus vaihtelee, sisäilman pitoisuus on vuorotellen tasapainotilan ylä- ja alapuolella, ja siksi keskiarvoistusajan kasvaessa I/O-suhde todennäköisesti lähestyy tasapainoarvoa [2].

$$I/O \text{ ratio} = C_{in, avg} / C_{out, avg} \sim F_{inf} \quad (3)$$

missä $C_{in, avg}$ = epäpuhtauden pitoisuuden keskiarvo sisätilassa

$C_{out, avg}$ = epäpuhtauden pitoisuus rakennuksen ulkopuolella.

Suhdeluku kuvaa sisäilman epäpuhtauspitoisuuden suhdetta ulkoilman pitoisuuteen. Mikäli suhdeluku on alle 1, sisäilmassa on vähemmän epäpuhtauksia kuin ulkoilmassa. Vastaavasti, jos suhdeluku ylittää arvon 1, sisäilmassa on enemmän epäpuhtauksia kuin ulkoilmassa.

4.5 Paine-ero asunnon vaipan yli

Rakennuksen vaipan yli vallitseva paine-ero mitattiin reaaliaikaisesti painemittareilla HK-Instruments DPT250-R8-AZ-D ja ProDual PEL, jotka rekisteröivät sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa. Paine-eroa mitattiin kahteen ilmansuuntaan rakennuksen ulkokuoren yli. Mittauspisteet sijaitsivat olohuoneessa ja makuuhuoneessa. Tuloksista laskettiin keskiarvot mittausjaksojen ajalta.

4.6 Lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus

Lämpötilaa mitattiin olohuoneesta kolmelta eri korkeudelta: lattiatasosta 10 cm lattian yläpuolelta, huoneen keskikorkeudelta (120 cm lattiasta) sekä katonrajasta 15 cm katon alapuolelta. Mittaukseen käytettiin kolmea Pt-100 anturia. Neljännellä samanlaisella Pt-100-anturilla mitattiin myös ulkoilman lämpötilaa.

Sisäilman suhteellista ilmankosteutta mitattiin keskeltä olohuonetta Vaisala HMT337 -kosteuslähettimellä. Mittaus suoritettiin jatkuvatoimisesti yhden minuutin mittausvälein.

4.7 Radonmittaukset

Radonpitoisuuden mittauksessa käytettiin jatkuvatoimista SARAD Radon Scout -mittalaitetta, joka mittaa sisäilman radonpitoisuutta havaitsemalla radonin hajoamistuotteet diffuusiokammiossa puolijohdeilmaisimen avulla. Laite mittasi radonpitoisuutta toistuvissa lyhyissä mittausjaksoissa, joista kunkin kesto oli kolme tuntia. Mittalaitteen vasteaika oli 120 minuuttia 95 %:iin lopullisesta pitoisuusarvosta, mikä osoittaa, että laite saavutti lähes tasapainotilan kahden tunnin kuluessa radonpitoisuuden muutoksesta.

Radonpitoisuutta seurattiin tutkimuksessa toteutetuissa neljässä eri mittausasetelmassa, joissa mittausaika vaihteli 6–12 vuorokauden välillä. Tutkimuksessa sisäilmaa mittaava mittalaite sijoitettiin keskelle kohdeasunnon olohuonetta. Verrokkimittaus suoritettiin asunnon ulkopuolella olevasta varastosta, jossa oli puurakenteinen seinä, betonilattia, ja jossa ei ollut lämmitysjärjestelmää. (Kuva 8)

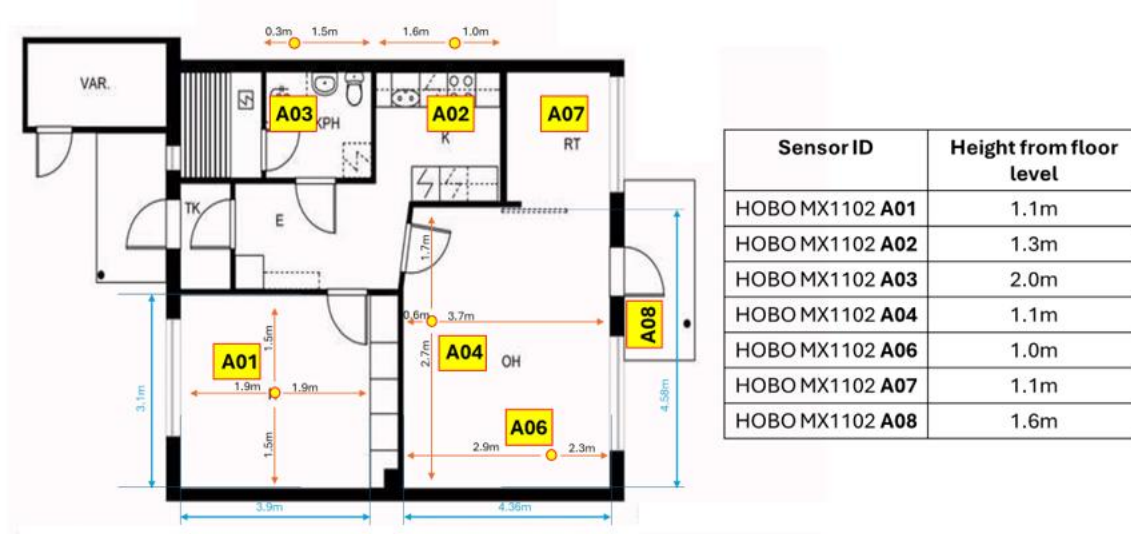


Kuva 8. Olohuoneen mittauspiste (vas.) sekä verrokkimittaus varastosta (oik.).

Radonaltistukseen liittyvä terveysriski on vahvasti yhteydessä pitkäaikaiseen altistukseen, minkä vuoksi altistumisen arviointi perustuu tyypillisesti sisäilman radonpitoisuuden vuosikeskiarvoon. Radonmittauksen ensisijaisena tavoitteena on määrittää pitoisuuden pitkän aikavälin keskiarvo, joka saadaan vähintään kahden kuukauden yhtäjaksoisella mittausjaksolla syyskuun ja toukokuun välisenä aikana [3]. Suomen lainsäädännössä olemassa olevien asuinrakennusten sisäilman radonpitoisuuden viitearvoksi on asetettu 300 Bq/m^3 , mikä vastaa EU:n säteilyturvallisuusdirektiivin (2013/59/Euratom) vaatimuksia. Tässä tutkimuksessa saadut tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia virallisen vuosikeskiarvon kanssa, mutta niistä saa suuntaa antavaa tietoa ilmanvaihdon vaikutuksesta radonpitoisuuteen.

4.8 Hiilidioksidipitoisuuden mittaukset Senser-laitteen tarkastelussa

Itseoppivan ilmanvaihdon säätöyksikkö Senserin (Entos Oy) toimintaa tutkittiin omana mittausasetelmanaan käyttäen testiaineena hiilidioksidia. Mittauspisteiden sijainti kohteessa esitetään oheisessa kuvassa (Kuva 9). Ilman hiilidioksidipitoisuudet mitattiin yhteistyössä Tampereen yliopiston Teletekniikan tutkimusryhmän kanssa (yhteyshenkilö Mohamed Elsayed). Mittauksissa käytettiin HOBO MX 1102 -sensoreita, jotka sijoitettiin mittausalueelle kuvan 9 mukaisesti. Tämä mahdollisti kattavan CO_2 -pitoisuuksien seurannan eri testiskenaarioissa.



Kuva 9. Ilman hiilidioksidipitoisuuden mittauspisteiden sijainti huoneistossa.

Henkilösimulaattoreiden hiilidioksidituoton lisäys laskettiin mittauspisteestä mitattujen ilman hiilidioksidin pitoisuuden tasapainopitoisuuksien erotuksena silloin, kun simulaattori oli toiminnassa verrattuna tilanteeseen, jolloin simulaattori oli pois päältä. Simulaattorit olivat toiminnassa ja pois päältä 6 h jaksoissa. Tasapainopitoisuudet laskettiin toimintajakson viimeisen tunnin ajalta.

5. Tulokset

Seuraavissa kappaleissa esitellään interventiossa saadut tulokset.

5.1 Poistoilmavirrat, ilmatiiviys ja rakenteen vuodot

Poistoilmaventtiilin paine-eromittauksen perusteella määritetyt poistoilmavirrat korvausilmareittien kokeiden aikana vaihtelivat välillä 34,6–36,7 dm³/s. Ne sekä rakenteen ilmatiiviys ilmaistuna ilmanvuotolukuina n_{50} ja q_{50} eri mittausetelmissä on ilmoitettu taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri mittausetelmien mitatut poistoilmavirrat ja ilmanvuotoluvut.

Mittausetelma	Koeaika pvm, alku	Koeaika pvm, loppu	Poistoilma- virta [dm ³ /s]	Ilmanvuoto- luku n_{50} [1/h]	Ilmanvuoto- luku q_{50} [m ³ /hm ²]
Karmiventtiilit tiiviisti suljettuna	3.4.2025	8.4.2025	34.6	1.75	1.29
Karmiventtiilit auki	10.4.2025	21.4.2025	36.2	2.16	1.59
Uudet korvausilmaventtiilit ilman suodatinta	24.4.2025	1.5.2025	36.7	4.79	3.54
Uudet korvausilmaventtiilit suodattimilla	6.5.2025	14.5.2025	36.2	3.52	2.60

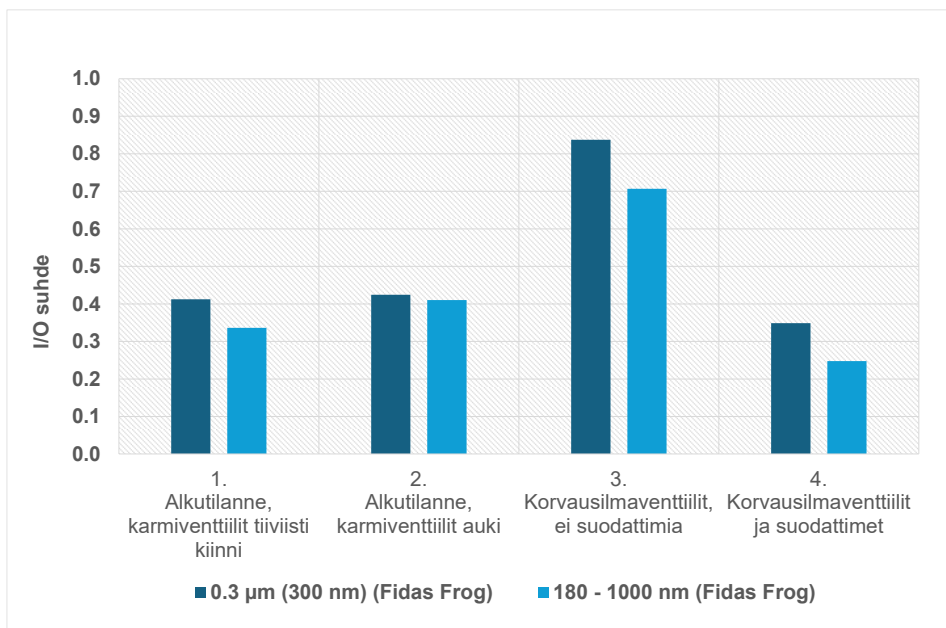
Vuotokohtia havaittiin asunnon nurkissa ulkoseinien, lattian ja katon yhtymäkohdissa. Lisäksi vuotoa esiintyi ikkunatiivisteissä, karmiventtiilien ala- ja yläpuolella, saunan sähköliitännässä, patterien läpivienneissä ja sälekaihtimen säätönupin läpiviennissä.

5.2 Ulkoilman hiukkasten kulkeutuminen sisätiloihin

Taulukossa 3 ja kuvassa 10 on esitetty eri korvausilmareittien mittausasetelmien aikaiset I/O-suhteet eli sisäilman epäpuhtauspitoisuuden ja ulkoilman pitoisuuden väliset suhteet.

Hiukkaskokoalue	I/O-suhde			
	1. Alkutilanne, karmiventtiilit tiivisti kiinni	2. Alkutilanne, karmiventtiilit auki	3. Korvausilma- venttiilit, ei suodattimia	4. Korvausilma- venttiilit ja suodattimet
0.3 µm (300 nm) (Fidas Frog)	0.41	0.42	0.84	0.35
180 - 1000 nm (Fidas Frog)	0.34	0.41	0.71	0.25

Taulukko 3. I/O-suhteiden keskiarvot eri mittausasetelmissä tarkasteltuna hiukkaskoolla 0,3 µm ja hiukkaskokoalueella 180 – 1000 nm mittalaitteella Fidas Frog.



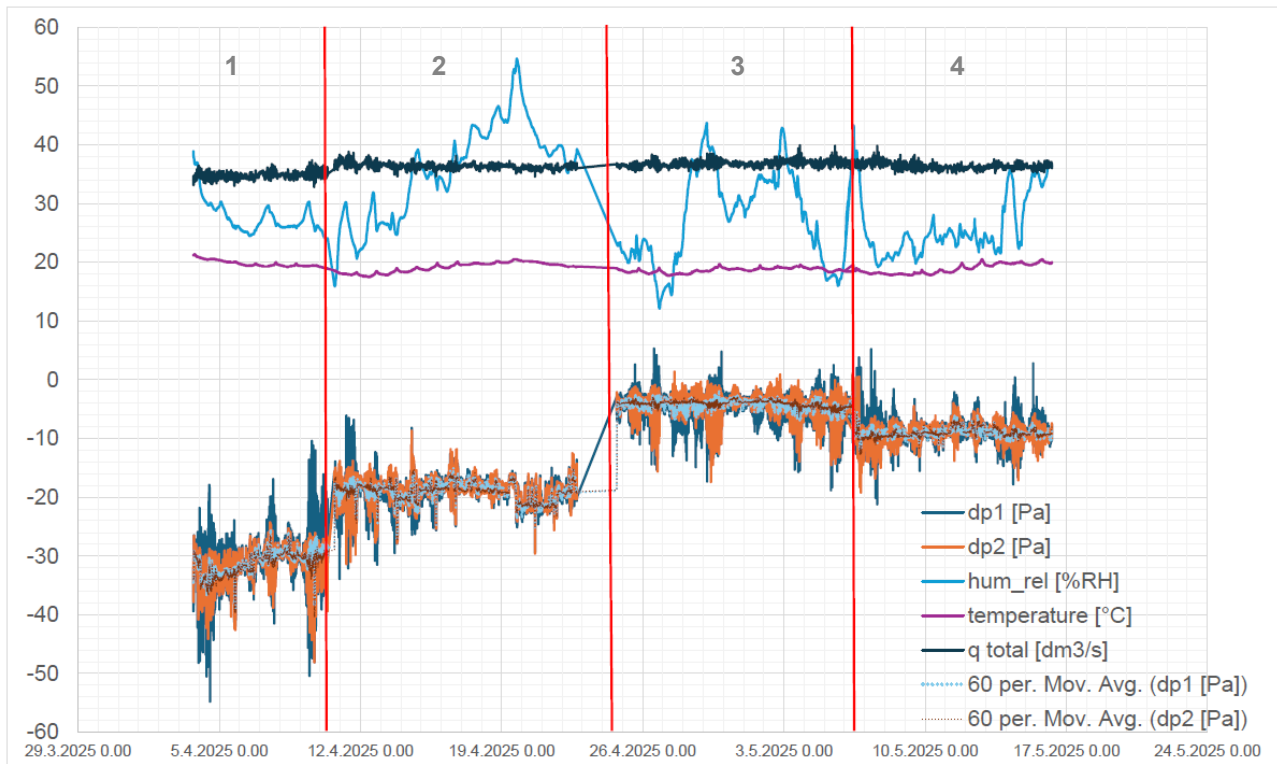
Kuva 10. I/O-suhteiden keskiarvot eri mittausasetelmissä.

5.3 Paine-ero asunnon vaipan yli

Taulukossa 4 on esitetty eri korvausilmareittien mittausasetelmissa huoneiston vaipan yli mitattujen paine-erojen keskiarvot. Koko intervention ajalta mitatut paine-erot on esitetty kuvassa 11.

Taulukko 4. Paine-erot huoneiston vaipan yli ulkoilmaan.

Mittausasetelma	Paine-ero ulkoilmaan, keskiarvo [Pa]
Karmiventtiilit tiiviisti suljettuna	-31
Karmiventtiilit auki	-20
Uusi korvausilmaventtiili ilman suodatinta	-4
Uusi korvausilmaventtiili suodattimella	-9



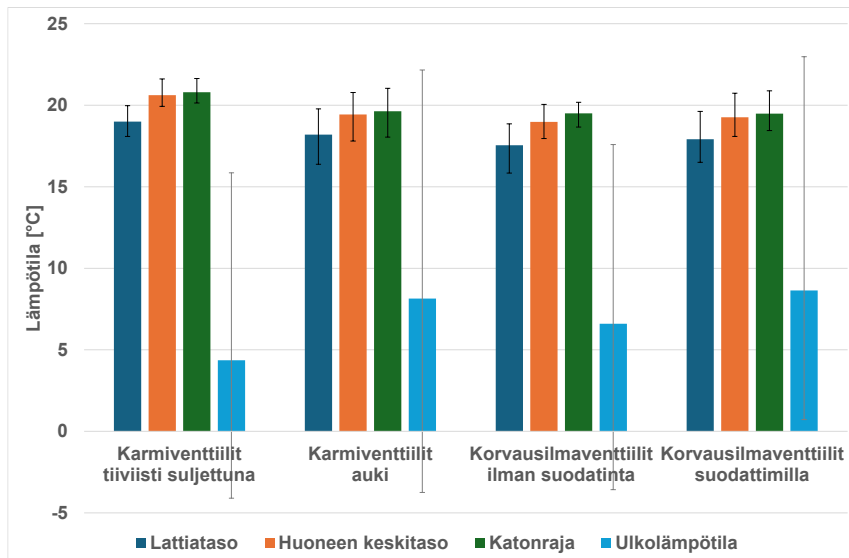
Kuva 11. Paine-erot (dp 1 olohuone ja dp 2 makuuhuone) huoneiston vaipan yli intervention aikana eri mittausasetelmissa: 1. lähtötilanne (ei selkeää reittiä, karmiventtiilit tiiviisti kiinni), 2. karmiventtiilit, 3. korvausilmaventtiilit ilman suodattimia ja 4. korvausilmaventtiilit suodattimilla.

5.4 Lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus

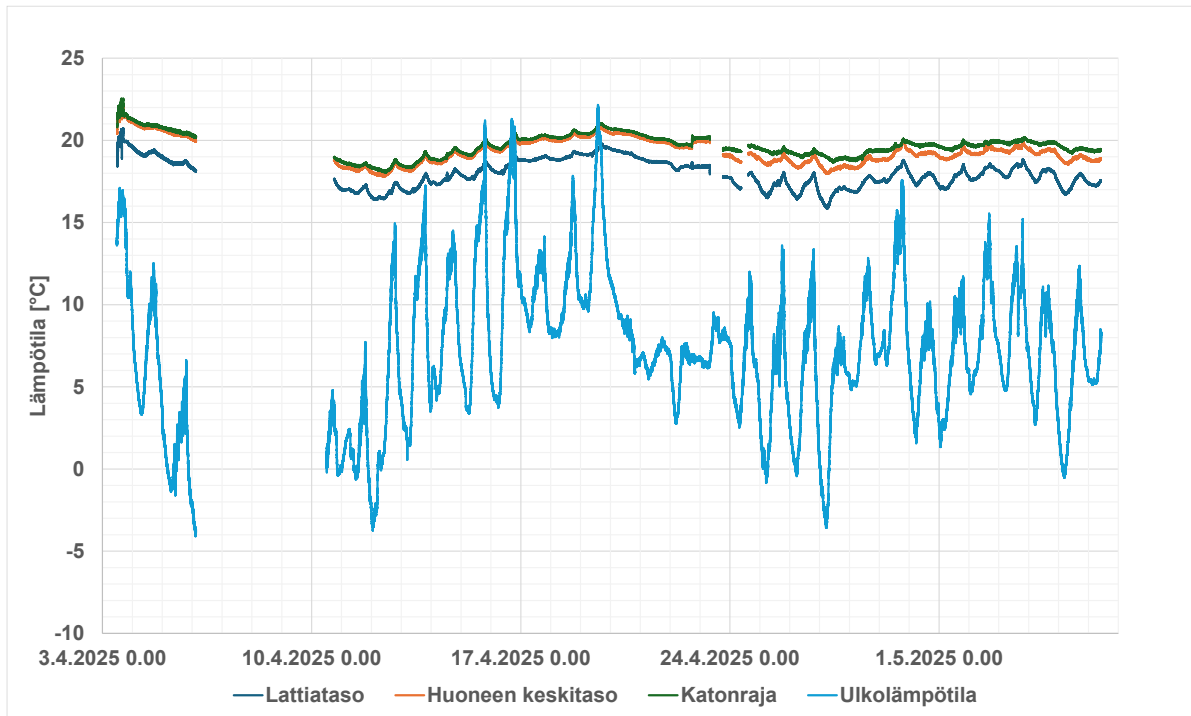
Lämpötilat ja sisäilman suhteellinen kosteus eri korvausilmareittien mittausasetelmien aikana on esitetty taulukossa 5. Kuvassa 12 ja 13 on esitetty lämpötilat minimi- ja maksimiarvoineen sekä eri mittausasetelmien aikainen ulkolämpötila. Kuvassa 14 on esitetty tarkemmin tilanteet, jossa käytössä oli alkuperäinen tuloilmareitti (karmiventtiilit auki) ja interventiossa tehty reitti (korvausilmaventtiilit suodattimilla).

Taulukko 5. Sisälämpötilan keskiarvo eri mittausasetelmissä.

Mittausasetelma	Koeaika pvm, alku	Koeaika pvm, loppu	Suhteellinen ilmankosteus [%]	Sisälämpötila, olohuone [°C]		
				Lattia- taso	Huoneen keskitaso	Katon- raja
Karmiventtiilit tiiviisti suljettuna	3.4.2025	8.4.2025	28	19.0	20.6	20.8
Karmiventtiilit auki	10.4.2025	21.4.2025	35	18.2	19.4	19.6
Uudet korvausilmaventtiilit ilman suodatinta	24.4.2025	1.5.2025	27	17.6	19.0	19.5
Uudet korvausilmaventtiilit suodattimilla	6.5.2025	14.5.2025	25	17.9	19.3	19.5



Kuva 12. Lämpötilat minimi- ja maksimiarvoineen sekä eri mittausasetelmien aikainen ulkolämpötila.



Kuva 13. Lämpötilat mittauspisteittäin intervention aikana.



Kuva 14. Tuloilmareitin vaikutus huoneen lämpötilaan käytettäessä karmiventtiileitä tai korvausilmaventtiileitä suodattimilla ulkoilman lämpötilan keskiarvon ollessa n. 8,5 °C.

5.5 Radonpitoisuus

Taulukossa 6 on esitetty eri korvausilmareittien mittausasetelmien aikana mitatut radonpitoisuudet sekä kohdeasunnossa että vertailutilassa.

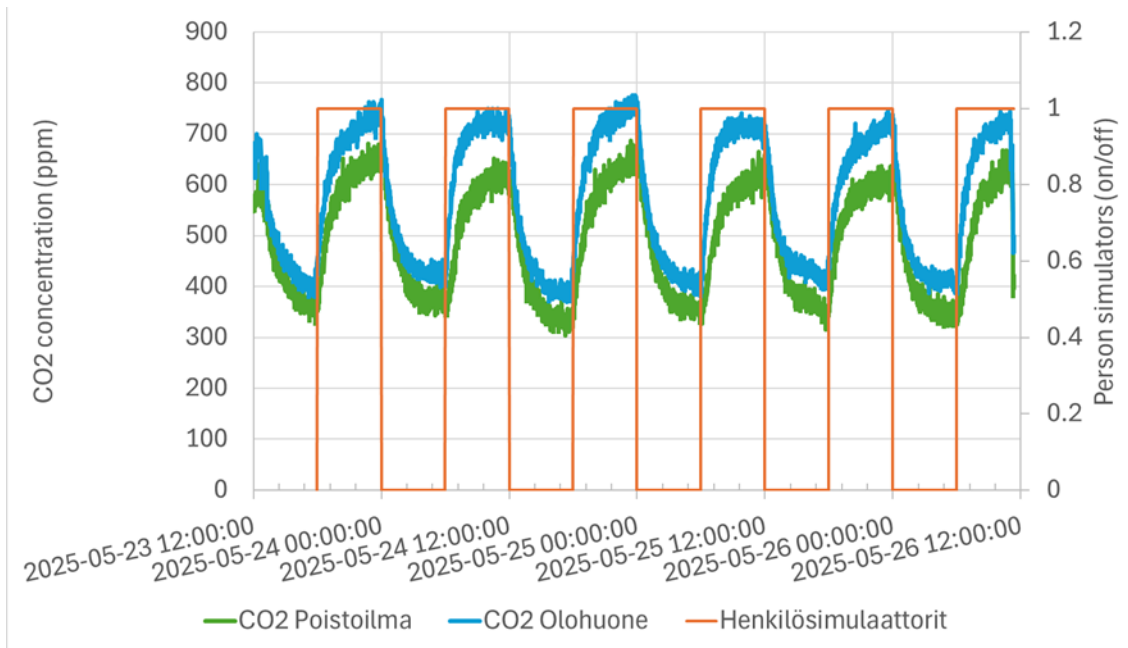
Taulukko 6. Mitatut radonpitoisuudet eri mittausasetelmissä.

Mittausasetelma	Radonpitoisuus sisällä [Bq/m ³]	Radonpitoisuus referenssi [Bq/m ³]
Karmiventtiilit tiiviisti suljettuna	730	34
Karmiventtiilit auki	396	36
Uusi korvausilmaventtiili ilman suodatinta	11	37
Uusi korvausilmaventtiili suodattimella	19	38

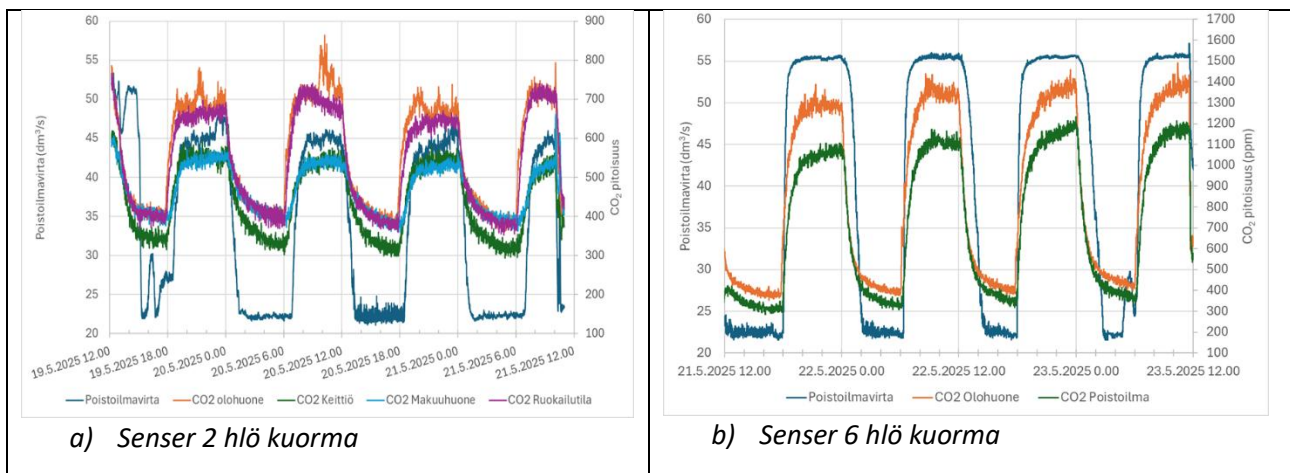
5.6 Ilmanvaihdon säätöyksikkö Senserin toiminta

Vertailutilanteessa vakiopoistoilmavirralla 36,5 dm³/s olohuoneen hiilidioksidipitoisuus alkoi nousta heti, kun henkilösimulaattoreiden hiilidioksidin päästö alkoi (Kuva 15), luonnollisesti. Hiilidioksidin pitoisuus olohuoneessa tasaantui keskimäärin 760 ppm:ään, mikä tarkoittaa noin 350 ppm lisäystä taustapitoisuuteen verrattuna (Kuva 17). Poistossa hiilidioksidipitoisuuden nousu alkoi hieman myöhemmin ja jäi alhaisemmalle tasolle noin 630 ppm, hiilidioksidipitoisuuden nousu oli keskimäärin 220 ppm.

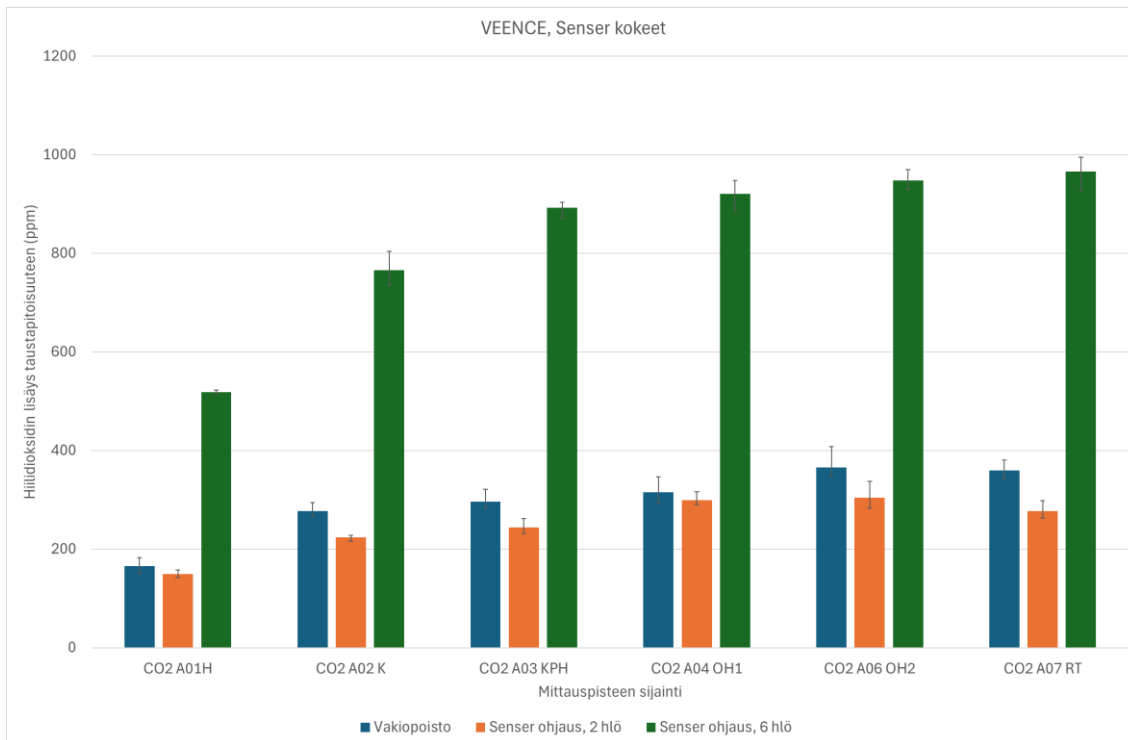
Senser-laitteen toiminta ja vaikutus hiilidioksidipitoisuuksiin on esitetty kuvassa 16. Kuten vakiopoistotilanteessa, myös näissä kokeissa hiilidioksidin pitoisuus alkoi nousta olohuoneessa heti, kun hiilidioksidin päästö alkoi. Kahden henkilön kuormalla Senser-laitteen ohjaamassa poistoilmavirran lisäyksessä näyttäisi olevan noin 29-55 min viive, ennen kuin poistoilmavirta lisääntyy. Tänä aikana pitoisuus keittiön poistossa lisääntyi 112-134 ppm ja olohuoneessa 173-255 ppm. Viiveen jälkeen poistoilmavirta lisääntyi nopeasti 22 dm³/s:sta 46 dm³/s:iin ja tasapainopitoisuus olohuoneessa jäi keskimäärin 680 ppm, mikä vastaa keskimäärin 270 ppm lisäystä taustapitoisuuteen. Kuuden henkilön kuormalla poistoilmavirran lisäyksen aikaviive oli vain noin 10-15 min. Poistoilmavirta lisääntyi keskimäärin 24 dm³/s:sta 55 dm³/s:iin, jolla hiilidioksidin tasapainopitoisuus asettui keskimäärin tasolle 1355 ppm vastaten 945 ppm hiilidioksidilisää.



Kuva 15. Hiilidioksidipitoisuuden vaihtelu olohuoneessa ja keittiön poistoilmassa kokee aikana. Kuvaan on merkitty myös henkilösimulaattoreiden ajallinen käyttö.

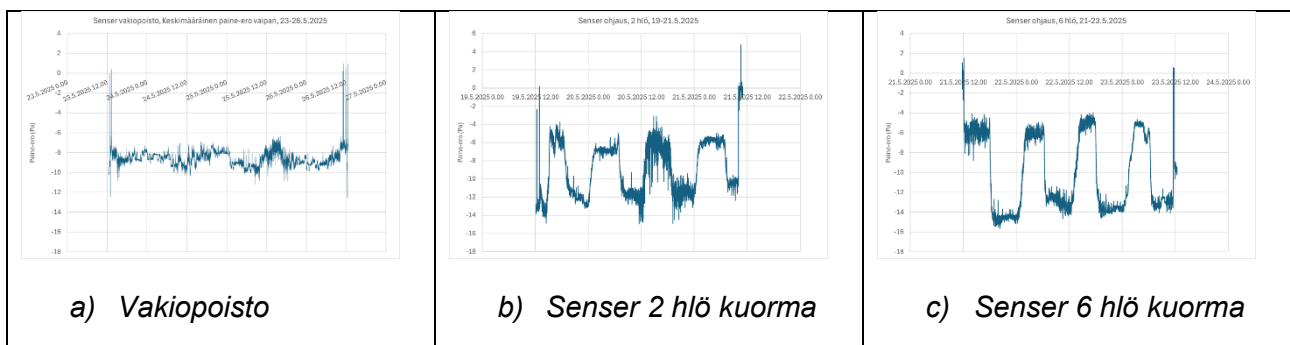


Kuva 16. Hiilidioksidipitoisuuden ja poistoilmavirran vaihtelu Sensorin ohjatessa poistokonetta.
a) Olohuoneessa henkilösimulaattorit vastasivat 2 henkilön lämpö- ja hiilidioksidikuormaa.
b) Olohuoneessa henkilösimulaattorit vastasivat 6 henkilön lämpö- ja hiilidioksidikuormaa.



Kuva 17. Hiilidioksidipitoisuuslisä eri mittauspisteissä ja eri koetilanteissa.

Keskimääräiset paine-erot vaipan yli mitattiin myös kolmessa eri tilanteessa. Vakiopoistolla vaipan keskimääräinen paine-ero oli -8,6 Pa, jolloin poistoilmavirta oli 36,5 dm³/s. Sensor-ohjauksella kahdella henkilöllä paine-ero oli 8,7 Pa sekä aikapainotettu keskimääräinen poistoilmavirta 33,9 dm³/s, kun taas kuudella henkilöllä vastaavat arvot olivat 10,0 Pa ja 41,3 dm³/s. Vaipan paine-erojen vaihtelu eri koetilanteissa on esitetty kuvassa 18. Mitatut radonpitoisuudet vaihtelivat Sensor-mittausten aikana huoneiston sisätilassa 18-64 Bq/m³ välillä. Referenssipisteessä radonpitoisuus vaihteli välillä 38-40 Bq/m³. Tuloksia arvioitaessa on huomattava, että mittausaika oli lyhyt, vain 2-3 vuorokautta.



Kuva 18. Sensor-kokeiden aikana mitattu keskimääräinen paine-eron vaihtelu vaipan yli eri koetilanteissa.

6. Tulosten tarkastelu

Kohdeasunnon korvausilmareittien koetilanteiden aikaiset poistoilmavirrat vaihtelivat välillä 34,6 – 36,7 dm³/s, mikä vastasi ilmanvaihtuvuutta (ACH, Air Changes per Hour) 0,8 – 0,9 1/h. Tarkastellun asunnon rakennusvaipan kokonaistiiviys oli karmiventtiilien ollessa auki 1,6 m³/(h·m²) ja suodattimellisten korvausilmaventtiilien kanssa 2,6 m³/(h·m²). Lukemat ovat tiiviysluokituksen mukaan normaalilla tasolla. Ympäristöministeriön energiatehokkuutta koskevan asetuksen (1010/2017) mukaan uusien asuntojen ilmanpitävyydelle tulee olla < 4,0 m³/(h·m²).

Kun ulkoilman lämpötila oli keskimäärin noin 8,5 °C ja tuloilma johdettiin joko alkuperäisten avoimien karmiventtiilien tai interventiossa asennettujen suodattimella varustettujen korvausilmaventtiilien kautta, tuloilman reitillä ei havaittu merkittävää vaikutusta olohuoneen keskeltä mitattuun sisälämpötilan keskiarvoon.

Korvausilmareittien tutkimuksen alkutilanteessa ulkoilman hiukkasten kulkeutuminen sisäilmaan vuotoilman mukana oli vähäistä karmiventtiilien ollessa tiiviisti suljettuna. Tässä tilanteessa ulkoa tuleva korvausilma kulkeutui rakennuksen vaipan ilmapuotojen kautta, kuten ikkunan tiivisteiden, lattian ja seinän välien sekä seinien sähköläpivientien vuotojen kautta. Kun karmiventtiilit avattiin, hiukkasten vuoto sisälle lisääntyi. Korvausilman reitin parantaminen uudella korvausilmaventtiilillä lisäsi edelleen ulkoilman hiukkasten pääsyä sisätilaan. Hiukkassuodattimen lisääminen korvausilmaventtiiliin vähensi hiukkasten vuotoa sisätilaan selvästi. Suhteellinen väheneminen pienhiukkasten määrässä oli 65 prosenttia. Kun korvausilmaventtiileissä ei ollut lainkaan suodattimia, ulkoilman hiukkasten I/O-suhde jäi silti alle yhden, mikä johtui pääasiassa hiukkasten depositiosta pinnoille. Tämä aiheuttaa pintojen likaantumista ja pölyn kertymistä sisätiloihin.

Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä Sensor säättää poistoilman määrää reaaliaikaisesti kuormituksen mukaan. Kokeissa verrattiin hiilidioksidipitoisuutta ja poistoilmavirtaa vakiopoistoon eri henkilökuormilla. Sensor-ohjauksella sisäilman hiilidioksidipitoisuus pysyi matalampana kuin vakiopoistolla, vaikka keskimääräinen poistoilmavirta oli pienempi, ja järjestelmä reagoi kuormituksen kasvuun nopeammin. Tämä osoittaa energiatehokkaan ilmanvaihdon potentiaalin, sillä tarpeenmukainen ohjaus voi vähentää energiankulutusta erityisesti lämmityksen ja jäähdytyksen yhteydessä.

Korvausilmareittien tutkimusten yhteydessä havaittiin, että radonpitoisuudet nousivat merkittäviksi tilanteessa, jossa huoneistosta puuttui selkeä korvausilman reitti ja tästä seurasi huomattava alipaine. Huoneiston alipaine oli pienimmillään, kun uudet korvausilmaventtiilit asennettiin ja niitä käytettiin ilman hiukkassuodattimia. Kun uudet korvausilmaventtiilit lisättiin, radonpitoisuudet tilassa olivat alimmillaan. Suodattimien lisääminen korvausilmaventtiileihin lisäsi paine-eroa vain vähän ja radonpitoisuus säilyi alhaisena. Sensor-järjestelmä yhdistettynä suodattimilla varustettuihin korvausilmaventtiileihin vaikutti vaipan keskimääräiseen paine-eroon vain vähän.

Rakennusfysiikan näkökulmasta ilmanvaihtojärjestelmien säätö, lisääntynyt ilmanvaihto tai korvausilmareittien puute voi aiheuttaa merkittäviä paine-eroja rakennuksen vaipan yli, mikä edelleen voi vaikuttaa epätoivottuihin ilmapuotoihin, alipaineistukseen ja lisääntyneeseen radonin kulkeutumiseen sisätiloihin [4, 5]. Erityisesti poistoilmanvaihdon varustetuissa rakennuksissa vaipan paine-ero on tärkein tekijä radonin pääsyssä sisätiloihin [4]. Pyrkimys vaipan ilmapuotojen minimointiin edellyttää tiiveyden parantamisen ohella, että sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero pidetään mahdollisimman pienenä [6].

7. Johtopäätökset

Tulokset osoittavat, että korvausilman reitillä ja suodatuksella on huomattava vaikutus sisäilman laatuun. Selkeiden korvausilmareittien puuttuminen aiheuttaa rakennukseen voimakkaan alipaineen, mikä johtaa korvausilman kulkeutumiseen sisätiloihin rakenteiden vuotokohtien kautta. Vaikka tämä voi vähentää ulkoilman hiukkasten vuotoa sisään, rakenteiden kautta kulkeutuva ilma saattaa sisältää muita epäpuhtauksia, kuten maaperän radonia.

Tutkimuksen perusteella suositellaan, että asuinrakennuksissa hyödynnetään suodattimellisia korvausilmaventtiilejä ja varmistetaan niiden moitteeton toiminta. Suodatus huolehtii siitä, että ulkoilman epäpuhtaudet eivät pääse sisälle. Suodattimien suodatustehokkuuksissa on vaihtelua, joten on olennaista käyttää testattuja ja laadukkaita suodattimia, joiden hiukkaserotusaste on osoitettu riittäväksi. Suodattimen tehokkuus voi heikentyä ajan tai likaantumisen vaikutuksesta, mikä edellyttää säännöllistä huoltoa ja vaihtoa. Rakenteiden kautta tapahtuva ilmanvaihto voi lisätä altistusta muille kuin ulkoilman epäpuhtauksille, joten tehokkaat korvausilmaratkaisut paine-erojen hallitsemiseksi ovat keskeisiä sisäilman laadun hallinnassa.

Tutkimus osoittaa myös, että Sensor-ohjattu ilmanvaihto reagoi sisäilman hiilidioksidipitoisuuden muutoksiin. Vaikka säädössä havaittiin pieni viive, lisääntynyt poistoilmavirta hillitsi hiilidioksidin pitoisuuden alemmalle tasolle kuin vakiovirtaus-tilanteessa, vaikka keskimääräinen poistoilmavirta oli vakiovirtausta pienempi. Sensor-järjestelmällä ohjattu ilmanvaihto mukautuu huoneiston henkilömäärän mukaan ja sen käyttö tarjoaa potentiaalia energiatehokkaaseen ilmanvaihtoon, ainakin tilanteessa, jossa järjestelmä ohjaa yksittäisen huoneiston poistoilmavirtaa.

8. Lähdeviitteet

- [1] Hänninen, O., H. Lehtomäki, and A. Korhonen, Ilmansaasteet ja kuolleisuus kärjessä, tautitaakka yli kaksinkertainen: Ympäristöaltisteiden kansanterveysvaikutukset. Ympäristö ja Terveys, 2020. 51(1): p. 6-13.
- [2] Rim, D., L.A. Wallace, and A.K. Persily, Indoor ultrafine particles of outdoor origin: importance of window opening area and fan operation condition. Environ Sci Technol, 2013. 47(4): p. 1922-9. 10.1021/es303613e
- [3] Säteilyturvakeskus. Radonin mittaaminen. 2025 [cited 2025 11.8.2025].
- [4] Kokotti, H., Kalliokoski, P., & Jantunen, M. (1992). Dependency of radon entry on pressure difference. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 26(12), 2247-2250. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90414-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90414-G)
- [5] Felicioni, L., Jiránek, M., Vlasatá, B., & Lupíšek, A. (2023). An Environmental Evaluation of Ventilation Systems Aimed at Reducing Indoor Radon Concentration. Buildings, 13(11), 2706. <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/11/2706>
- [6] Björkroth, M. and L. Eskola, Rakennusten paine-erojen mittausprojektin loppuraportti. 2019. p. 35 + liit. 13.

Certificate Of Completion

Envelope Id: D8F95EC0-FA92-4515-9C21-051110F6B98C		Status: Completed
Subject: Complete with Docusign: VTT-Asiakasraportti_VEENCE_Velco-ja-Cervi_21-10-2025.pdf		
Source Envelope:		
Document Pages: 21	Signatures: 1	Envelope Originator:
Certificate Pages: 1	Initials: 0	Hannu Salmela
AutoNav: Disabled		Tekniikantie 21, Espoo
Envelopeld Stamping: Disabled		., . P.O Box1000, FI-0204
Time Zone: (UTC+02:00) Helsinki, Kyiv, Riga, Sofia, Tallinn, Vilnius		Hannu.Salmela@vtt.fi
		IP Address: 130.188.192.101

Record Tracking

Status: Original	Holder: Hannu Salmela	Location: DocuSign
22 October 2025 09:23	Hannu.Salmela@vtt.fi	

Signer Events	Signature	Timestamp
---------------	-----------	-----------

Hannu Salmela	DocuSigned by: Hannu Salmela 7ADE18D09ECD43C...	Sent: 22 October 2025 09:24
Hannu.Salmela@vtt.fi		Viewed: 22 October 2025 09:24
Research Team Leader		Signed: 22 October 2025 09:25
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy		Freeform Signing
Security Level: Email, Account Authentication (None)	Signature Adoption: Pre-selected Style Using IP Address: 130.188.192.101	

Electronic Record and Signature Disclosure:
Not Offered via Docusign

In Person Signer Events	Signature	Timestamp
-------------------------	-----------	-----------

Editor Delivery Events	Status	Timestamp
------------------------	--------	-----------

Agent Delivery Events	Status	Timestamp
-----------------------	--------	-----------

Intermediary Delivery Events	Status	Timestamp
------------------------------	--------	-----------

Certified Delivery Events	Status	Timestamp
---------------------------	--------	-----------

Carbon Copy Events	Status	Timestamp
--------------------	--------	-----------

Witness Events	Signature	Timestamp
----------------	-----------	-----------

Notary Events	Signature	Timestamp
---------------	-----------	-----------

Envelope Summary Events	Status	Timestamps
-------------------------	--------	------------

Envelope Sent	Hashed/Encrypted	22 October 2025 09:24
Certified Delivered	Security Checked	22 October 2025 09:24
Signing Complete	Security Checked	22 October 2025 09:25
Completed	Security Checked	22 October 2025 09:25

Payment Events	Status	Timestamps
----------------	--------	------------