

Katja Rinkinen

IOT-teknologian hyödyntäminen rakennusaikaisten haitta-aineiden seurannassa ja työturvallisuuden optimoinnissa

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Rakennustekniikka

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Katja Rinkinen
Työn nimi	IOT-tekniologian hyödyntäminen rakennusaikaisten haitta-aineiden seurannassa ja työturvallisuuden optimoinnissa
Toimeksiantaja	Anti Rohumaa
Vuosi	2023
Sivut	75 sivua, liitteitä 6 sivua
Työn ohjaaja(t)	Petteri Härkönen, Marko Voutilainen

TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena on tutkia haitta-aineiden pitoisuuksia sekä emissioita uudisrakennuskohteessa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun hankkeessa toteutetussa kaksikerroksisessa testitalorakennuksessa. Rakennus on varustettu modernilla mittausjärjestelmällä, joka mittaa sisäilmanlaatua reaaliaikaisesti. Tutkimuksen ensisijainen tavoite on selvittää, missä määrin haitallisten aineiden pitoisuudet ylittävät nykyiset suositusarvot ennen ilmanvaihdon käynnistymistä ja sen jälkeen. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan myös ulko- ja sisäilman olosuhteiden vaikutusta emissioihin sekä arvioidaan, kuinka kauan kestää ennen kuin ilmanlaatu palautuu turvalliselle tasolle ilmanvaihdon käynnistämisen jälkeen.

Opinnäytetyössä tarkastellaan aluksi sisäilmanlaadun kannalta keskeiset tekijät, kuten yleisimmät haitta-aineet ja niiden lähteet sekä sisäilmastoluokitukset. Tämän lisäksi käydään läpi testitalon rakenneratkaisut ja mittausjärjestelmä sekä aistinvaraiset havainnot, joiden avulla rakennuksen sisä- ja ulkoilman olosuhteita seurataan, ja saadaan analysoitua sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä. Tutkimustuloksiin saadaan myös vertailua kaupallisten sensoreiden sekä Kuopion yliopiston tekemien mittausten tuloksiin.

Asiasanat: työturvallisuus, haitta-aineet, uudisrakentaminen, mittausjärjestelmät, ilmanvaihto

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Katja Rinkinen
Thesis title	The Utilization of IOT-technology in the Optimization of Harmful Substances and Occupational Safety during Construction Phases
Commissioned by	Anti Rohumaa
Time	2023
Pages	75 pages, 6 pages of appendices
Supervisor	Petteri Härkönen, Marko Voutilainen

ABSTRACT

This thesis examines how to use Internet of Things (IOT) technology to monitor the use of hazardous substances during construction phase and optimize occupational safety. The study examines the concentrations and emissions of pollutants in a two-storey test building in a new building project of the South-Eastern Finland University of Applied Sciences. The primary objective of the study is to determine the extent to which concentrations of harmful substances exceed the current recommended values before and after the air changeover. The study examines the impact of outdoor and indoor air conditions on emissions and estimates how long it takes for air quality to return to safe levels after the start of the air changeover.

The thesis reviews the key factors affecting indoor air quality, such as the most common pollutants and their sources, and indoor air quality classifications. Then the study focuses on the structural design and measurement system of the test building, as well as the sensory observations used to monitor indoor and outdoor air conditions in the building and to analyse the factors affecting indoor air quality. The results of the thesis are compared with those of commercial sensors and measurements conducted by the University of Kuopio.

Keywords: occupational safety, harmful substances, new construction, measurement systems, air changeover

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	9
1.2	Tutkimuksen rajaus ja tavoitteet	9
2	RAKENNUKSEN SISÄILMAN LAATUA HEIKENTÄVÄT TEKIJÄT	11
2.1	Epäpuhtaudet sisäilmassa.....	11
2.2	Sisäilmastoluokitukset	11
3	ALTISTUMINEN	13
3.1	Kemikaalit yleisesti	14
3.1.1	Aldehydit	15
3.1.2	Formaldehydi	15
3.1.3	Pienhiukkaset	16
3.1.4	Sisäilman hiilidioksidi	16
3.1.5	Styreeni.....	17
3.1.6	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC).....	17
3.1.7	Radon	18
4	RAKENNUSMATERIAALIEN PÄÄSTÖLUOKAT	19
4.1	Päästöluokkien määräytyminen ja mittausmenetelmät.....	20
5	SÄÄOLOSUHTEET	20
5.1	Tuuli ja ilmanpaine.....	20
5.2	Sade ja kosteus	21
6	ILMAVIRTAUKSET RAKENNUKSESSA	21
7	RAKENNUKSEN TIIVEYS.....	22
7.1	Ilmanvaihto	23
8	TESTITALON RAKENTEET JA MATERIAALIT.....	23
8.1	Testitalon pystytys	24
8.2	Rakennetyypit.....	24
8.3	Lämmitetty tuulettuva alustila.....	29

8.4	Ikkunat, ovet ja tiivistys	30
8.4.1	Testitalon ilmanvaihto	33
8.4.2	Ilmanvaihdon käynnistys.....	34
9	SENSORIJÄRJESTELMÄ	35
9.1	Milesight- anturit	35
9.1.1	ELSYS- anturit	36
	IOTSU® anturit.....	37
9.1.2	3K- anturit	38
9.1.3	WIISTE- anturit	38
10	MITTAUKSET	39
10.1	Rakennuksen ilmatiiveysmittaus.....	40
10.1.1	Testitalon ilmatiiveysmittaus	41
10.1.2	Ilmanvaihdon käynnistys.....	43
10.1.3	Ilmanvaihtokoneen säädöt.....	45
10.1.4	Testitalon toiset tiiveysmittaukset	49
10.2	VOC- mittaus	51
10.2.1	Pienhiukkasten mittaus	52
11	PILVIPALVELU.....	53
12	TULOKSET.....	55
12.1	Aistinvaraiset havainnot.....	56
12.1.1	Pienhiukkaset PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ja TVOC- pitoisuudet [ppb].....	59
12.1.2	Sisä- ja ulkoilman olosuhteet ajalla 26.5- 31.5.2023.....	61
12.2	TVOC- pitoisuudet	63
12.2.1	Hiukkaspitoisuudet.....	68
12.2.2	Olosuhteiden vaikutukset sisäilmanlaatuun	69
12.2.3	Sähkökatkosten hetkelliset vaikutukset.....	72
13	YHTEENVETO	74
14	POHDINTA.....	75
14.1	Kiitokset.....	76

LÄHTEET.....77

LIITTEET

Liite 1. Testitalon elementtien liitosdetaljit

TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

Emissiot	Materiaaleista haihtuvia yhdisteitä, jotka voivat muodostua, esimerkiksi yhdisteiden kemiallisessa hajoamisprosessissa.
Mikrobit	Bakteerit, homeet, hiivat, homeet ja alkueläimet.
Terpeenit	Monissa kasveissa luonnollisesti esiintyviä yhdisteitä.
PAH-yhdisteet	Aromaattiset hiilivedyt
Aldehydit	Aldehydeihin kuuluvat esimerkiksi, formaldehydi, asetaldehydi, butanaali, propaani ja heksaani.
Fenolit	Heikkoja happoja, joita käytetään esimerkiksi maalien, fenolihartsien, polymeerien, sekä elintarvikkeiden lisäaineiden valmistukseen.
Paine-ero	Syntyy tuuliolosuhteiden, ilmanvaihdon, lämpötilan ja hormivaikutuksen vuoksi.
Raja-arvo	Määritelty ehto tai lukuarvo, jonka mukaan voidaan päätellä vaatiiko tarkasteltu kohde toimenpiteitä.
POP-yhdisteet	Pysyvät orgaaniset yhdisteet.
Konvektio	Rakennuksen paine-erojen aiheuttama ilmavirtaus, joka voi konvektion avulla liikuttaa kosteutta.
Puskurivaikutus	Materiaalin kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta, tasapainoittamalla huoneilman suhteellista kosteutta.

LYHENTEET

RH-%	Suhteellinen kosteus, joka ilmaisee vesihöyryn määrän ilmassa, siihen nähden mitä kyseisessä lämpötilassa voi enimmillään olla vesihöyrynä.
ppb	Parts per billion. Mitta yksikkö, joka vastaa miljardiosaa, lukuna 10^{-9}
pm2.5	Pienhiukkasia, joiden läpimitta on alle $2.5 \mu\text{m}/\text{m}^3$
pm10	Pienhiukkasia, joiden läpimitta on alle $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$
HCHO	Formaldehydi
CO ₂	Hiilestä ja hapesta koostuva kemiallinen yhdiste eli hiilidioksidi.
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compounds).
TVOC	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus. (Total Volatile Organic Compound)
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	mikrogrammaa/ kuutiometri
$\mu\text{m}/\text{m}^3$	mikrometriä/ kuutiometri
HTP	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus

1 JOHDANTO

Rakentaminen on ala, joka on jatkuvassa liikkeessä. Viime vuosikymmenet ovat tuoneet mukanaan entistä keskeisimmiksi asioiksi rakennusten ympäristöystävällisyyden, energiatehokkuuden sekä kierrätettävyyden. Rakennukset suunnitellaan ilmatiiviiksi, ja toimivan ilmanvaihdon merkitys korostuu. Rakennusosalalla työskentelevät voivat altistua monille erilaisille haitta-aineille, työskentelyolosuhteiden merkitys on suuressa osassa altistumisen ehkäisemisessä. Teknologian kehittyessä erilaiset olosuhteiden sekä haitta-aineiden seurantajärjestelmät ovat tulleet mukaan rakentamisen laadunvalvontaan. Teknologiaa hyödyntämällä voidaan myös parantaa työturvallisuutta ja ennalta ehkäistä rakennusalan ammattilaisten altistumista eri haitta-aineille.

1.1 Opinnäytetyön tausta

Savonlinnassa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puu- ja hybridirakenteiden liitosten tiiveyden ja kosteuskäyttäytymisen hallinta (PUUTIKO-hanke) rakennettiin kaksikerroksinen testitalo, jonka pinta-ala on 50 m². Talossa tutkitaan puu- ja hybridirakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa, pääpainona rakennuksen ilma- ja höyrytiiveyttä sekä puurakenteiden välisten liitosten toimintaa. Testitaloon asennetaan nykyaikaisia sensorijärjestelmiä, jotka mittaavat lämpötilaa, kosteutta sekä ulko- ja sisäilmanvälisiä paine-eroja. Mittausantureissa on hiilidioksidin, pienhiukkasten sekä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden (Total Volatile Organic Compound) eli TVOC-arvojen mittausominaisuus. Testitalossa hyödynnetään lämpökamera-tekniikkaa. Projektin tuloksena tulleista mittaustuloksista tuotetaan rakentamisen ja asumisen laadun kannalta parhaat suositukset liitos- ja rakennejärjestelmien kehittämiseen sekä standardisoimiseen.

1.2 Tutkimuksen rajaus ja tavoitteet

Tämä opinnäytetyö keskittyy uudisrakentamisen prosessiin, erityisesti puu- ja hybridirakenteisiin sekä ristiin liimattuun puuhun (CLT). Tutkimuksen painopistealueita ovat rakennusten tiiveys ja tehokkaan ilmanvaihdon merkitys, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) ja formaldehydin (HCHO) vaikutus, primääriemissiot, pienhiukkaset, asumisterveys ja työturvallisuus.

Tutkimusmenetelmänä käytetään testitaloon asennettua sensorijärjestelmää, joka mittaa sisäilman epäpuhtauksia sekä kosteutta ja lämpötilaa. Seuranta tehdään tietyn ajanjakson aikana, ja keskitytään eri olosuhteiden vaikutukseen emissioihin.

Yksi tutkimuksen tavoitteista on selvittää, nousevatko haitallisten aineiden ja pienhiukkasten tasot vaarallisiin mittasuhteisiin rakennuksen tiivistämisen jälkeen, ja kuinka kauan ja nopeasti nämä tasot palaavat turvalliseen määrään toimivan ilmanvaihdon avulla. Lisäksi tarkastellaan ulko- ja sisäilman olosuhteiden sekä tilojen käytön vaikutusta näihin arvoihin.

Kun sisäilman laatu tasaantunut turvalliselle tasolle ja koneellinen ilmanvaihto on ollut toiminnassa riittävän kauan, arvioidaan kuinka nopeasti haitallisten aineiden pitoisuudet kasvavat, ilmanvaihtojärjestelmän lakatessa toimimasta esimerkiksi sähkökatkoksen seurauksena.

Tämä tutkimus on olennainen, koska jo ennen rakennuksen varsinaisia käyttäjiä, rakennusprosessissa mukana olevat ammattilaiset, kuten rakentajat, viettävät sisätiloissa useita tunteja päivittäin. Ilmanvaihdon ollessa vasta suunnitella tai asennettavana, rakennuksessa saattaa olla korkeita haitta-aineiden pitoisuuksia, jotka voivat vaikuttaa terveyteen ja työturvallisuuteen.

Opinnäytetyön teoreettinen viitekehys muodostuu alan kirjallisuudesta, tieteellisistä julkaisuista ja aikaisemmista tutkimuksista.

Työn tavoitteena on tutkia ja ymmärtää rakentamisen aikaisen sisäilman laadun vaihteluita uudisrakennuksissa, erityisesti puu- ja hybridirakenteissa sekä ristiin liimatussa puussa (CLT). Työ keskittyy arvioimaan rakennuksen tiiveyden ja tehokkaan ilmanvaihdon merkitystä, ja tutkii erityisesti haitallisten aineiden ja pienhiukkasten määrää sisäilmassa. Tämä pitää sisällään tutkimuksen siitä, kuinka ulko- ja sisäilman olosuhteet sekä tilojen käyttö, vaikuttavat sisäilman laatuun. Tutkimus pyrkii selvittämään, miten nopeasti sisäilman laatu heikkenee, jos ilmanvaihtojärjestelmä lakkaa toimimasta, ja kuinka nopeasti se palautuu tehokkaan ilmanvaihdon myötä. Työn lopullisena tavoitteena on edistää asumisterveyttä ja parantaa työturvallisuutta rakennustyömailla.

2 RAKENNUKSEN SISÄILMAN LAATUA HEIKENTÄVÄT TEKIJÄT

Rakennuksen sisäilman laatuun voi vaikuttaa monien eri tekijöiden summa: lämpö- ja kosteusolosuhteet, materiaalivalinnat, rakennustöiden suoritus. Huono sisäilma voi aiheuttaa terveydellisiä ongelmia, jopa vakavaa sairastumista. Syynä voi esimerkiksi olla kosteusvauriosta johtuvat mikrobin kasvat, kemikaalit, kuten rakennusmateriaalien emissiot. [1, s. 2.]

2.1 Epäpuhtaudet sisäilmassa

Sisäilmassa on aina jonkin verran kaasua- ja hiukkasmaisia epäpuhtauksia. Useimmat ovat ihmisille harmittomia, kuitenkin osa näistä voi olla haitallisia tai jopa myrkyllisiä. Epäpuhtauspitoisuuksiin voi vaikuttaa ihmisten toiminta sekä olosuhdetekijät, kuten kosteus ja lämpötila. [11, s. 5.]

2.2 Sisäilmastoluokitukset

Ensimmäisen kerran luokitukset julkaistiin vuonna 1995, jonka jälkeen on ilmestynyt päivitettyjä versioita. Vuonna 2018 julkaistu sisäilmastoluokitus on tarkoitettu rakennuskohteen rakennuttajan, suunnittelijoiden, omistajan ja käyttäjän avuksi sisäilmaston tavoitetasojen määrittämiseen. Sisäilmastoluokitus ei kuitenkaan ole viranomaisohje tai tulkinta sellaisesta. Sisäilmastoluokituksessa mainittavat asiat muuttuvat sopimusosapuolia sitoviksi, kun niihin viitataan hankkeen sopimusasiakirjoissa. Tämän lisäksi myös sisäilmastoluokituksen asioita esitetään työmaan laatusuunnitelmissa. Sisäilmastoluokat on jaettu kolmeen osaan: S1, S2 ja S3 (Kuva 1). [2, s. 5.]



Kuva 1. Sisäilmastoluokat (mukaillen Sisäilmastoluokat 2018)

Sisäilmastoluokituksen tavoitearvoissa (taulukko 1) hiilidioksidipitoisuus koskee ihmisperäistä hiilidioksidia. Pienhiukkasten tavoitearvo mitataan sisäilmassa 24 tunnin keskimääräisenä pitoisuutena, standardin SFS- EN 12341 mukaisesti. Radonpitoisuuden määrittelyyn käytetään Säteilyturvakeskuksen hyväksymää mittausmenetelmää. Luokituksessa ei ole ilman suhteelliselle kosteudelle annettu tavoitearvoa, sillä talvisin pakkasilla suhteellinen kosteus voi laskea hyvin alhaiseksi. Kuitenkin paikallista kostutusta käytettäessä ilman suhteellisen kosteuden tulee pysyä alle 60 %, kostutus ei myöskään saa aiheuttaa kosteus- tai mikrobivaurioiden riskiä. Ilmankostuttimia käytettäessä on myös huomioitava, etteivät kostutuslaitteet lisää ilman epäpuhtauksia. [2, s. 7.]

Taulukko 1. Sisäympäristön tavoitearvoja luokittain (mukailten Sisäilmastoluokitus 2018)

	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuuslisä*[ppm]	<350	<550	<800
Radonpitoisuus [Bq/m ³]	<100	<100	<200
PM2.5[μg/m ³]	<10	<10	<25
PM2.5 sisällä/ulkona	<0,5	<0,7	-
Ilmansuhteellinen kosteus[%RH]	-	-	-
Olosuhteiden pysyvyys [%käyttörajusta]	-	-	-
Toimi- ja opetustilat	90%	90%	
Asunnot	90%	80%	
*Suurempi kuin sisäilman hiilidioksidipitoisuus			

Sisäilman tavoitearvot suositellaan mitattavaksi 6–12 kk kuluessa, kun uusi rakennus on otettu käyttöön. Vaikka mitatut arvot pysyisivätkin suositeltujen tavoitearvojen rajoissa, niin se ei yksiselitteisesti takaa sisäilman terveellisyyttä. Herkemmillä ihmisillä voi tulla oireita, vaikka pitoisuudet pysyisivätkin alle tavoitearvojen. Tavoitearvot on määritelty oleskeluvyöhykkeelle, joka kattaa alueen lattiasta 1,8 metrin korkeuteen ja 0,6 metriä seinistä. [3. s. 8.]

3 ALTISTUMINEN

Rakennustyössä altisteet voivat olla esimerkiksi kemiallisia. Kemiallisiin altisteisiin kuuluvat haitallisten aineiden pölyt ja höyryt sekä biologiset altisteet: virukset, bakteerit ja homeet. Fysikaalisia altisteita ovat kuumuus, kylmyys, melu sekä värinä. Työpaikalla tulee tehdä asianmukainen lakisääteinen riskien arviointi, joten työympäristön haittatekijät tulee tunnistaa. [8.] Työssä altistuminen on useimmiten moninkertaista verrattuna elinympäristössä tapahtuvaan altistukseen, esimerkiksi ruoan tai juoman välityksellä. Epäpuhtaudet työpaikan ilmasta imeytyvät hengitysteiden kautta suoraan verenkiertoon, myös ihon

kautta altistuminen on yleistä. Kemikaalien käyttö on lisääntynyt monilla työpaikoilla. Kemikaalit ovat myös reaktiivisempia ja ne sisältävät enemmän yksittäisiä yhdisteitä. Vuonna 2005 sosiaali- ja terveydenhuollon tuotevalvontakeskuksen (STTV) julkaisun mukaan työssä käytettiin noin 30 000 kemiallista tuotetta, ja joissa oli yhteensä 6 700 erilaista kemiallista yhdistettä. [8, s. 13, 14.] Kemiallisten altisteiden vakavien myrkytysten osuus on pienentynyt, mutta on kuitenkin olemassa riski pitkäaikaiseen altistumiseen kemiallisille aineille. Kemiallisten altisteiden on todettu aiheuttavan kroonisia sairauksia ja niiden työperäisyyttä voi olla hyvin vaikeaa todentaa. [8, s. 14.] Viime vuosina käyttöön on otettu erilaisia sertifikaatti- ja korttikoulutuksia rakennusalan ammattilaisille, joiden avulla voidaan osoittaa tietyn aihepiirin asiantuntevuutta suorittamalla hyväksytysti koulutus. Koulutuksissa käydään läpi myös työturvallisuuteen liittyviä asioita. Esimerkiksi elokuussa 2024 alkaen di-isosyanaattien käyttöön vaaditaan työntekijöiden suojelemiseksi koulutus, joten kemikaalitoimittajien on vuodesta 2022 alkaen täytynyt varmistaa, että vastaanottaja saa koulutusvaatimuksesta tiedon. Koulutus koskee kaikkia teollisuus ja ammattikäytössä di-isosyanaattia sisältäviä tuotteita käyttäviä. Rajoitus ei koske tuotteita, jotka sisältävät di-isosyanaatteja alle 0,1 painoprosenttia. Kemikaalia käytetään esimerkiksi polyuretaanimuoveissa (PUR). [7.] Näin ollen suuren osan rakennusalan ammattilaisista tulee käydä koulutus, kuten pinnoittajien ja ikkunoiden asentajien.

3.1 Kemikaalit yleisesti

Kemikaalit voivat aiheuttaa oireita paikallisesti tai systeemisesti imeytyessään elimistöön. Paikallinen vaikutus vaikuttaa yleensä heti, kun kemikaali joutuu kosketukseen esimerkiksi ihon tai silmien kanssa. Kemikaalin systeeminen vaikutus tapahtuu silloin kun aine esimerkiksi imeytyttyään vereen kulkeutuu eri elimiin aiheuttaen elimissä vaikutuksia. Kemikaalien vaikutukset voivat olla ohimeneviä tai pysyviä, jolloin syntyy vaurio, joka säilyy, vaikka altistuminen on loppunut. Vaikutukset voivat ilmetä vasta myöhemmin altistumisesta, tai kemikaalia voi kertyä elimistöön toistuvan altistumisen myötä, jolloin kemikaalin haitallinen vaikutus voimistuu ja aiheuttaa vaurioita elimistössä. [4.] Uusia kemikaaleja ja niiden yhdisteitä on rakennusmateriaaleissa huomattavia määriä, vaikka tutkimuksia näistä kemikaaleista tehdäänkin ja ne ovat laadukkaita,

voi silti tapahtua reaktioita tuotteissa eri olosuhteiden vaikutuksessa sekä erituotteissa olevien ainesosien sekoittumisesta keskenään. Materiaaleissa voi vaikutuksia ilmetä vasta myöhemmässä vaiheessa, joka esimerkiksi saattaa aiheuttaa kemikaaleista tulevaa emissiota huoneilmaan, ja ilmetä terveydelle haitallisena.

3.1.1 Aldehydit

Aldehydit kuuluvat kemiallisiin epäpuhtauksiin, joiden lähteitä ovat yleensä kosmeettiset aineet, palamiskaasut, tupakansavu, desinfiointi- ja torjunta-aineet, tekstiilit sekä erilaiset rakennusmateriaalit. Aldehydejä voi esiintyä runsaasti sisäilmassa esimerkiksi mineraalivillan kosteusvaurion takia, jonka vuoksi jotkut mikrobit alkavat muodostamaan aldehydejä sisäilmaan. [9.]

3.1.2 Formaldehydi

Formaldehydi on väritön ja pistävän hajuisen kaasu, ja vaikka hajua ei välttämättä aina tunnu voi silti aineen pitoisuus olla haitallinen. Formaldehydi voi reagoida esimerkiksi voimakkaiden emästen kanssa ja vapauttaa hiilidioksidia. Toistuva altistuminen formaldehydille voi aiheuttaa kroonista nenän ja silmien ärsytystä. [4.] Formaldehydin on eläinkokeissa todettu aiheuttavan nenänsyöpää sekä sen on todettu myös aiheuttavan soluperimän muutoksia aiheuttavaksi aineeksi. Formaldehydin pääasiallinen lähde on ollut lastulevyt, joissa on käytetty ureaformaldehydiliimaa, mutta sitä voi myös vapautua ilmaan parketeista, paneeleista sekä laminaateista, jos näiden liimaamiseen on käytetty ureaformaldehydipitoista liimaa. Myös joissakin lakoissa ja maaleissa on käytetty lähtöaineena formaldehydiä. Kosteudesta ja lämpötilasta formaldehydissa tapahtuu hajoamisreaktiota, jolloin formaldehydiä vapautuu enemmän ilmaan. [9.] Haitalliseksi tunnettu kahdeksan tunnin formaldehydipitoisuus on $0,37 \text{ mg/m}^3$, ja 15 minuutin haitalliseksi tunnettu pitoisuus on $0,74 \text{ mg/m}^3$. Sisäilmassa vuosikeskiarvo ei saa ylittää $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 30 minuutin keskiarvo ei saa ylittää $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 30 minuutin raja-arvo on sama kuin WHO:n asettama arvio eli $0,1 \text{ mg/m}^3$. [10.]

3.1.3 Pienhiukkaset

Hiukasmaiset epäpuhtaudet luokitellaan yleensä kokonsa mukaan, hengitettävät hiukkaset <math><10\ \mu\text{m}</math> ja pienhiukkaset <math><2,5\ \mu\text{m}</math>. Pienhiukkaset sisäilmassa ovat pääsääntöisesti peräisin ulkoilmasta. Ulkoilmassa hiukkasia on luonnostaan sekä ihmisen toiminnan seurauksena. Tarkkoja turvallisia määriä pitoisuuksille ei ole määritetty, kuitenkin kaikilla erikokoisilla hiukkasilla on terveysvaikutuksia, joihin vaikuttavat hiukkasten koostumus sekä koko. Pienhiukkaset PM_{2,5}, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 2,5 μm , on kiinnitettävä erityistä huomiota, sillä ne kulkeutuvat keuhkorakkuloihin saakka. Hiukkaset PM₁₀, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 10 μm , kulkeutuvat keuhkoputkiin sekä henkitorveen saakka. PM₁₀ pitoisuus 24 tunnin mittauksen aikana saa enintään olla sisäilmassa 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja PM_{2,5} pitoisuus 24 tunnin mittauksen aikana sisäilmassa enintään 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. [24; 23.]

3.1.4 Sisäilman hiilidioksidi

Tyydyttävänä hiilidioksidipitoisuutena sisäilmassa pidetään alle 1 500 ppm. Hiilidioksidipitoisuus sisäilmassa vaatii toimenpiteitä, jos pitoisuus on 2 100 mg/m^3 (1 150 ppm) suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus. [23.]

380-440 ppm	ulkoilman pitoisuus (vaihtelee mm. vuodenajan mukaan)
enintään 1 200 ppm	ilmanvaihtoasetuksen suunnitteluarvo sisäilman hiilidioksidin hetkelliselle pitoisuudelle huonetilan suunniteltuna käyttöaikana (tarkkaan ottaen 800 ppm suurempi kuin ulkoilman pitoisuus)
1 550 ppm	asumisterveysasetuksen kynnyсарvo, jonka ylityessä on varmistettava, ettei tiloissa aiheudu terveyshaittaa niukan ilmanvaihdon takia (tarkkaan ottaen 1 150 ppm suurempi kuin ulkoilman pitoisuus)
5 000 ppm / 8 h	työpaikan ilman suurin sallittu pitoisuus 8 tunnin keskiarvona
alle 20 000 ppm	lyhyt altistuminen ei aiheuta terveysvaikutuksia
yli 20 000 ppm	kiihdyttää hengitystä ja aiheuttaa päänsärkyä
40 000 ppm / 30 min	suurin pitoisuus, jolle terve työntekijä voi altistua 30 minuutiksi saamatta palautumattomia terveydellisiä vaurioita tai poistumista vaikeuttavia vammoja
yli 75 000 ppm	huonontaa henkistä suorituskykyä, aiheuttaa levottomuutta, sekavuutta ja näköhäiriöitä
yli 100 000 ppm	aiheuttaa hengenahdistusta, kovaa päänsärkyä, kuulon heikentymistä, pahoinvointia, oksentelua, tukehtumisen tunnetta, hikoilua, tokkuraista oloa ja tajuttomuuden noin 15 minuutin kuluessa

Kuva 2. Hiilidioksidiarvoja (Rakennustarkastusyhdistys. RTY r.y)

3.1.5 Styreeni

Styreeni eli vinyylibentseeni on huoneenlämmössä ja paineessa nestemäistä väritöntä, öljymäistä, myrkyllistä sekä herkästi syttyvää. Terveyshaittoja ovat esimerkiksi hengitysteiden sekä silmien ärsytys. Styreeni voi häiritä hermoston toimintaa ja on aiheuttanut koe-eläimissä syöpää. Kohonneita styreenipitoisuuksia on havaittu tapauksissa, joissa polyesterihartsipohjaista rakennusmateriaalia on käytetty väärin. Raja-arvoina joulukuussa 2023 pidetään arvoja hajukynnykselle $70 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ja huoneilman pitoisuudelle enintään $40 \mu\text{m}/\text{m}^3$. [9.] Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet (HTP) työilman raja-arvoille ovat kahdeksan tunnin pitoisuus 20 ppm ($86 \text{ mg}/\text{m}^3$) ja 15 minuutin arvo 100 ppm ($430 \text{ mg}/\text{m}^3$). [9.]

3.1.6 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden toimenpiderajat asumisterveysasetuksen mukaan, kokonaispitoisuudelle laskettuna tolueenivasteella huoneilmassa on $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yksittäiselle yhdisteelle yleinen toimenpideraja huoneilmassa on $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ellei ole toisin määrätty. [23.] Taulukossa 2 on esitetty haihtuvien orgaanisten yhdisteiden toimenpiderajoja muutamalle yhdisteelle.

Taulukko 2. VOC- yhdisteiden toimenpiderajat [23.]

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) toluenivasteella lasketut huoneilman pitoisuuksien toimenpiderajat	
Yhdiste	Toimenpideraja
2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaalidioli diisobutyraatti (TXIB)	10 µg/m ³
2-etyyli-1-heksanoli (2EH)	10 µg/m ³
Naftaleeni	ei saa esiintyä hajua, 10 µg/m ³
Styreeni	40 µg/m ³

3.1.7 Radon

Väritön ja hajuton radioaktiivinen kaasu ja sitä syntyy jatkuvasti uraanin hajo-
tessa maankuoressa. Mittaaminen on ainoa tapa selvittää radonpitoisuus.
[10.] Radonia voi siirtyä sisäilmaan rakennuksen alla olevasta maa- ja kallio-
perästä, täytemaasta, vedestä sekä kiviperäisistä rakennusmateriaaleista. [9.]
Joulukuussa 2023 ei kuitenkaan ole tiedossa, että kiviperäisistä rakennusma-
teriaaleista olisi johtunut radonpitoisuuksien ylityksiä sisätiloissa. Viitearvot ra-
donpitoisuuksille ovat asuin- ja muissa oleskelutiloissa 300 becquerelia
(Bq/m³) Uusi asunto tulee suunnitella ja rakentaa siten, että radonpitoisuus ei
saa ylittää 200 Bq/m³. [9.]

4 RAKENNUSMATERIAALIEN PÄÄSTÖLUOKAT

Rakennus- ja sisustusmateriaaleista vapautuu rakennuksen sisäilmaan monenlaisia kemikaaleja. Kemikaalit voivat olla peräisin esimerkiksi materiaaleissa käytetyistä raaka-aineista, valmistusprosessissa tapahtuneen virheen takia, materiaalin vanhenemisesta, tai materiaalin virheellisestä asennuksesta, jonka vuoksi kemikaaliemissiot voimistuvat. Rakennusmateriaalien päästöluokituksen tarkoitus on edistää vähäpäästöisempien rakennustuotteiden ja materiaalien käyttöä sekä kehittämistä. Rakennusmateriaalien päästöluokitus on kolmeosainen (kuvat 3 ja 4). Luokat ovat M1, M2 ja M3, jossa M1 on paras luokka. Vähäpäästöisten materiaalien käyttö ei välttämättä kuitenkaan takaa hyvää sisäilmaa. [2, s. 24.]

Vaatimukset rakennustuotteille	
LUOKKA M1	
Formaldehydi emissio on alle 0,05 mg/m ² h	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaisemissio (TVOC) on alle 0,2 mg/m ² h. Yhdisteistä on tunnistettava 70%
Ammoniakin (N ₂ CO) emissio on alle 0,03 mg/m ² h	IARC:n luokittelun mukaisten luokkaan 1 kuuluvien karsinogeenisten aineiden (WHO 1987) emissio on alle 0,005 mg/m ² h.
Materiaali ei haise (hajuun tyytymättömien osuus on alle 15 %)	Laastit, tasoitteet ja siloitteet eivät saa sisältää kaseiinia.

Kuva 3. Vaatimukset rakennustuotteille. Luokka M1 (mukaiillen Sisäilmastoluokitus 2000)

Vaatimukset rakennustuotteille	
LUOKKA M2	
Formaldehydi emissio on alle 0,125mg/m ² h	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaisemissio (TVOC) on alle 0,4 mg/m ² h. Yhdisteistä on tunnistettava 70%
Ammoniakin (N ₂ CO) emissio on alle 0,06 mg/m ² h	IARC:n luokittelun mukaisten luokkaan 1 kuuluvien karsinogeenisten aineiden (WHO 1987) emissio on alle 0,005 mg/m ² h.
Materiaali ei haise (hajuun tyytymättömien osuus on alle 30%)	Laastit, tasoitteet ja siloitteet eivät saa sisältää kaseiinia.

Kuva 4. Vaatimukset rakennustuotteille. Luokka M2 (mukaiillen Sisäilmastoluokitus 2000)

4.1 Päästöluokkien määräytyminen ja mittausmenetelmät

Testaamattomille rakennusmateriaaleille ei myönnetä luokitusmerkkiä. Materiaalit täytyy emissiotestata ja testauksen jälkeen luokitella vaatimustasojen mukaisesti. Materiaaliyhdistelmien päästöluokka määräytyy huonoimman materiaalin mukaan. Materiaalin emissiomittaus on uusittava aina, jos materiaalissa muuttuu ainesosa, tai valmistusprosessissa tehdään muutoksia. Mittausmenetelmissä noudatetaan seuraavia ohjeita: "Protocol for the Emission Testing of Building Materials for the Emission Classification of Building Materials. VTT Chemical Technology" [3, s. 24, 25.]

5 SÄÄOLOSUHTEET

Suomen pituus on noin 1 100 kilometriä ja eripuolilla maata sääolot vaihtelevat paljon. Kuitenkin rakentamismääräykset koskien esimerkiksi lämmöneristystä ovat samat koko maassa. Vuodenaikojen lämpötilavaihtelut ovat suuria, mutta epäsäännöllisiä. Myös paikalliset tekijät vaikuttavat lämpötilaan, kuten maaston muodot, vesistöt ja maanpeitteen laatu. Suomi kuuluu alueeseen, jossa esiintyy usein matalapainetta, josta johtuu kaikkina vuodenaikoina säiden suuri vaihtelevuus. Keskilämpötiloja pidetään tärkeimpinä lämpöolojen mittareina. Keskiarvo mitataan tavallisesti kansainvälisellä 30 vuoden normaalikautena. Vuorokausikeskilämpötila saadaan laskettua kahdeksan havainnoinnin keskiarvona, joka havainnoidaan kahden tunnin välein. Kuukausikeskilämpötila saadaan vuosikeskiarvon ja eri vuorokausien kuukausikeskiarvon aritmeettisella keskiarvolla. Lämmityslaitteiden mitoittamiseen käytetään ulkolämpötilan kahden vuorokauden keskilämpötilaa. [6, s. 7.]

5.1 Tuuli ja ilmanpaine

Tuuli aiheutuu alueellisista ilmanpaine-eroista ja se on osittain aina pyörteistä. Tuuli aiheuttaa rakennuksen pinnoille virtaus- ja painejakauman, johon vaikuttavat tuulen nopeuden ja suunnan lisäksi, maaston korkeus erot, rakennuksen mittasuhteet, ympäröivä kasvillisuus, läheisyydessä sijaitsevat toiset rakennukset sekä muut esteet, jotka rajoittavat virtausta. Tuuli aiheuttaa rakenteita kuormittavaa imua ja painetta sekä myös huonetiloissa ilmanpainevaihteluita, jonka vaikutukset täytyy ottaa huomioon rakenteiden mitoituksessa ja jäykis-

tyksessä. Se vaikuttaa myös tiiviyteen, pintakerrosten kiinnitykseen, kosteuden kulkeutumiseen rakenteissa sekä rakennuksen energiankulutukseen. Ilmanpaineen muuttuessa nopeasti lyhyellä matkalla, on vaikutusta tuulen nopeuteen. Sitä nopeampi on tuuli mitä, nopeammin ilmanpaine laskee tai nousee siirryttäessä kahden pisteen välillä. Suomessa keskimääräinen ilmanpaine on 1 012 hPa (hehtoPascalia), jossa esiintyy myös vuodenaikavaihtelua jonkin verran. Tuulella on myös välillisiä vaikutuksia rakennuksen kosteusrasitukseen, viistosade aiheutuu voimakkaista tuulista, joka taas rasittaa julkisivupintoja. Talvella voimakas tuuli voi kuljettaa lunta esimerkiksi yläpohjan eristeisiin tuuletusrakojen kautta. [6, s. 9, 10, 16.]

5.2 Sade ja kosteus

Sateen olomuotoja ovat vesisade, lumisade, räntäsade, tihkusade sekä rae-sade. Rakennustöiden toteutuksessa on otettava huomioon kosteuden, sateen ja lumen aiheuttamat rasitukset rakennuksen ulkovaipalle sekä rakenteiden ja tiivistysratkaisujen valinnassa. Rakennusaikana on huolehdittava rakennustarvikkeiden sekä keskeneräisten rakenteiden suojaukselta, jotta vältetään mahdolliselta myöhemmältä kosteuden aiheuttamalta vauriolta, joka voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa sisäilmaongelmia. [5, s. 16.] Ilmaston lämpenemisen takia myös Suomessa viistosateiden määrä on lisääntymässä, joka ei ole niin helposti hallittavissa kuin pystysade. Pystysateen haitalliset vaikutukset saadaan yleensä poistettua hyvin toteutetuin kattorakentein ja riittävän pitkällä räystäällä. [6, s. 16.]

6 ILMAVIRTAUKSET RAKENNUKSESSA

Rakennuksen ilmavirtaukset eli konvektiot syntyvät ilmanpaine-erojen vaikutuksesta. Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollinen konvektio on ilman tiheyseroista johtuvaa pystysuoraa ilmanvirtausta. Luonnollisia konvektioita esiintyy pääasiassa kerroksellisissa rakenteissa, kuten huokoisessa lämmöneristeessä sekä ikkunoiden ilmaraoissa. Tämä on huomioitava, kun tarkastellaan seinissä, lämmöneristävyyttä, kosteusteknistä toimintaa sekä tiiveyttä. Tiheissä puupohjaisissa eristeissä konvektiolla ei ole niinkään merkitystä eristeen toimivuuteen. Seinärakenteissa luonnollista konvektiota esiintyy lähinnä mineraalivilloissa, joiden eristepaksuus on yli 125 mm. Luonnollinen

konvektio voimistuu, kun ilmaraon tai lämmöneristeen syvyyttä ja korkeutta lisätään. Lämmöneristeen eristävyys tällä on vain vähän vaikutusta. Pakotettu konvektio on ilmanvirtausta rakenteiden läpi, joka syntyy savupiippuvaikutuksen, LVI-laitteiden sekä tuulen vaikutuksesta johtuvasta paine-erosta. Pakotettu konvektio vaatii myös epätiivelyskohtia rakenteissa, niin että ilmavirtaus on mahdollista rakenteen läpi. Savupiippuvaikutuksen syntyminen tapahtuu, kun huoneilma lämpenee, ja sen tiheys pienenee, jolloin ilma kevenee ja pyrkii nousemaan ylös, jonka vaikutuksesta huoneen yläosaan muodostuu ylipaine, ja alaosassa on alipainetta. Tämä muodostaa painottaman tason, jonka sijainti riippuu esimerkiksi avoimista ikkunoista ja ovista, tulisijasta sekä ilmanvaihtokanavista. [6, s. 34, 35, 36.]

7 RAKENNUKSEN TIIVEYS

Nykymääräysten mukaan rakennus on suunniteltava tiiviiksi, jolloin toimivan ilmanvaihdon merkitys korostuu. Ilmanpitävyys rakenteissa vaikuttaa esimerkiksi energian kulutukseen, rakennuksen kosteustekniseen toimivuuteen sekä sisäilmanlaatuun. Kun rakennus on suunniteltu ja toteutettu tiiviiksi, ei lämpö karkaa ilmavirtausten mukana ulos, eikä kylmää ilmaa virtaa sisälle. Alapohjan tiiveys vaikuttaa erityisesti sisäilmanlaatuun. Tiiviiksi toteutettu alapohja estää mikrobien sekä mahdollisesti esiintyvän radonin pääsyn sisäilmaan. Ilmanvaihto on suunniteltava riittävän tehokkaaksi, ja laitteiston tulee olla tasapainotettu, sillä tiiviissä rakennuksessa ilma ei vaihdu käytännössä lainkaan vuoto-kohtien kautta. [21, s. 73–75.]

7.1 Ilmanvaihto

Rakennuksen ilmanvaihdon tulee olla riittävä epäpuhtauksien poistamiseksi sekä hyvän sisäilman laadun takaamiseksi. Ilmanvaihdon on tuotava rakennukseen riittävä ulkoilmavirta sekä poistettava sisäilmasta terveyteen ja viihtyvyyteen vaikuttavia epäpuhtauksia, hajuja ja kosteutta. Ilmanvirtojen mitoituksessa on käytettävä vähimmäisvaatimuksena, koko asuinpinta-alaa kohden laskettua ulkoilmavirtaa $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$, joka vastaa $0,5 \text{ l/h}$ ilmanvaihtokerrointa. Ulkoilmavirta koko asunnossa vähintään $18 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$, huonekohtaisesti vähintään $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. Ulkoilmavirtaa on tuotava jokaiseen asuinhuoneeseen vähintään $8 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. Makuuhuoneet, jotka ovat yli 11 m^2 , on ulkoilmavirtaa tuotava $12 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. Lisäksi jos asunnossa on sauna, on kokonaisulkoilmavirtaan lisättävä $6 \text{ dm}^3/\text{s}$. Ilmanvaihdon tehostusta täytyy voida ohjata tarvittaessa 30 % suuremmaksi. [1, s. 14; 20.]

8 TESTITALON RAKENTEET JA MATERIAALIT

Testitalossa on yhteensä kolmekymmentäyksi elementtiä, joissa on erilaisia liitos-, tiivistys sekä lämmöneristys ratkaisuja. Testitalossa on kaksi kerrosta ja koneellisesti tuuletettu lämmin alustila. Alustilan lattia on 80 mm paksu teräsbetoni-laatta, jonka lämmöneristeenä on 150 mm EPS 100. Ensimmäinen kerroksen alapohja on 280 mm paksu CLT-laatta (Kuva 6). Välipohjat ovat 200 mm paksuja CLT-elementtejä, ja yläpohja on 100 mm paksua CLT-elementti levyä. Yläpohjan päällä on LVL-levyistä ja palkeista rakennettu kolme osainen koteloelementtikatto. Ensimmäisessä kerroksessa on LVL-elementtejä sekä betoni- LVL-hybridielementtejä. Ikkunoita kerroksessa on kuusi kappaletta sekä ulko-ovi. Testitalon toinen kerros on rakennettu CLT-elementeistä, etelä-, itä- ja länsiseinät ovat 100 mm paksua CLT-levyä, pohjoisseinä on 240 mm paksu massiivielementti seinä. Ikkunoita kerroksessa on kahdeksan kappaletta sekä yksi ulko-ovi.

8.1 Testitalon pystytys

Testitalo pystytettiin paikallisen urakoitsijan toimesta, maaliskuussa 2023 viikoilla 11–12. Sää oli suurimmaksi osaksi suotuisa asennuksille. Päivisin oli pientä pakkasta ja selkeää. Rakennuksen perustukset olivat valmistuneet loppusyksystä 2022, ja suojattu säältä odottamaan elementtien asennusta. Kuvissa ensimmäisten elementtien asennusta. Alapohja ja eteläseinä (Kuvat 5–7).



Kuva 5. Alapohja elementti.



Kuva 6. AP elementit asennettuna.

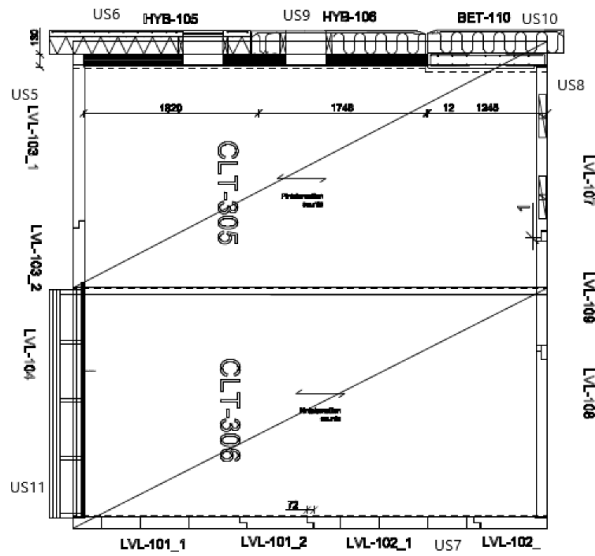


Kuva 7. Eteläseinän LVL- elementti

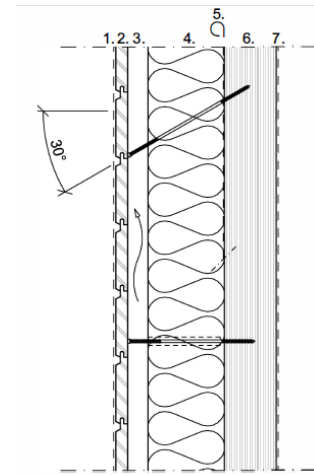
8.2 Rakennetyypit

Kerroksessa yksi on rakenteiden eristeenä käytetty eteläisellä seinällä 180 mm paksua Parocin Cortex One jäykkää kivivillalevyä tuulensuojapinnotteella, seinällä on myös vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukangas (kuva 9). Ensimmäisen kerroksen länsiseinä muodostuu kahdesta erilaisesta rakennetyyppi ratkaisusta, seinän toinen puolikas on 120 mm paksua LVL-levyä, jossa eristeenä 180 mm paksu Paroc Cortex One kivivillalevy sekä vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukalvo. Toisessa osassa rakennetyyppinä 40 mm paksu LVL-levy, 39 x 225 mm runkotolpat k600 + kivivillaeriste sekä vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukangas (Kuvat 10–12). Pohjoisseinällä on betoni- hybridielementit. Seinä on rakennettu kolmesta erilaisesta elementistä, yhdessä elementeistä on rakennetyyppinä 120 mm LVL-levy vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukangas, ja 180 mm paksu jäykkä kivivillalevy sekä 70 mm paksu teräsbetoni ulko-kuori (Kuva 13). Toisessa elementissä on 120 mm LVL-levy, 220 mm paksu

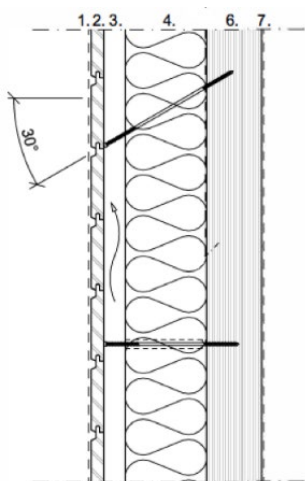
mineraalivillalevy sekä 20 mm Parma tehdasrappaus (Kuva 14). Kolmas elementti on tyypiltään betoni sandwich elementti, jonka sisäkuori on 160 mm paksu teräsbetoni. Eristeenä 220 mm paksu mineraalivillalevy sekä rapattu pinta, 20 mm Parma tehdasrappaus (Kuva 15).



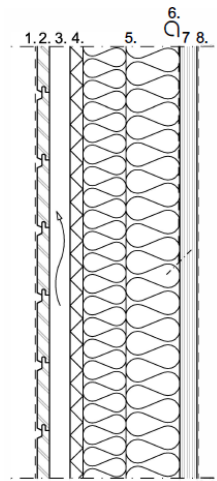
Kuva 8. 1 krs. Pohjakuva



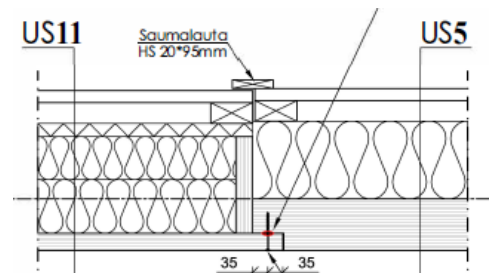
Kuva 9. US7 eteläseinä
1 krs.



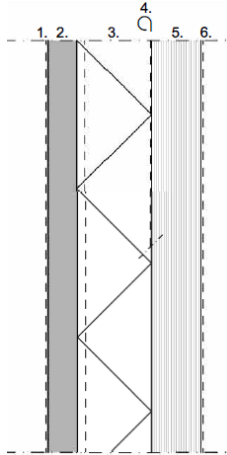
Kuva 10. US5 länsiseinä
1 krs.



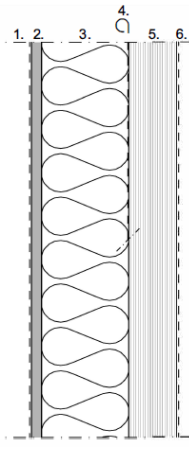
Kuva 11. US11
länsiseinä 1 krs.



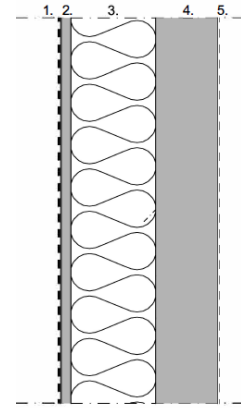
Kuva 12. US5 ja US11 liitos 1 krs.



Kuva 13. US6
pohjoisseinä 1kr.

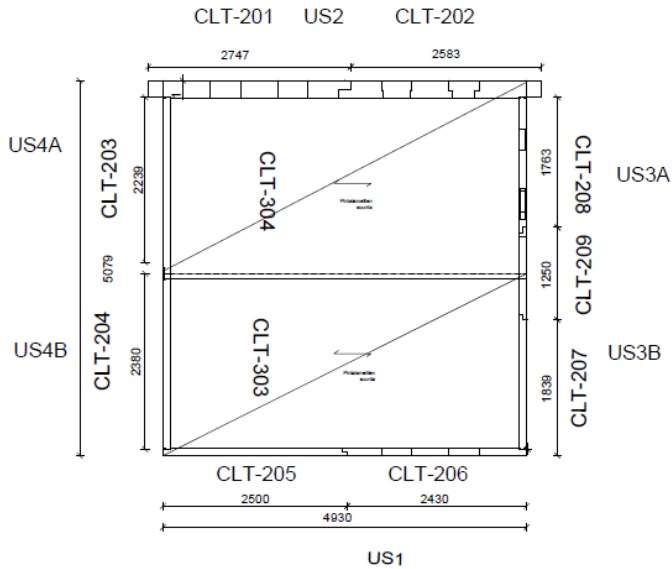


Kuva 14. US9
pohjoisseinä 1kr.

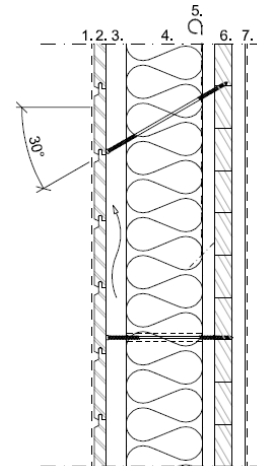


Kuva 15. US10
pohjoisseinä 1kr.

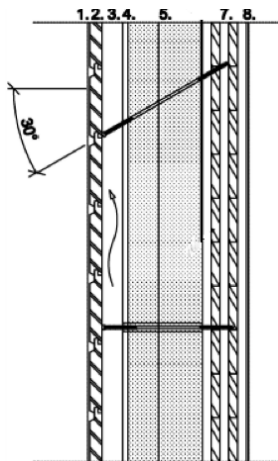
Toisen kerroksen rakennetyypinä eteläseinällä on 100 mm paksua CLT-levyä, lämmöneristeenä Paroc Cortex One tuulensuojapinnoitteella sekä vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukangas (Kuva 17). Itäseinällä on kahdenlaista eri rakennetyyppiä. Toinen osa on eristetty puukuitueristeellä 100 mm + 70 mm sekä 12 mm paksulla puukuituisella tuulensuojalevyllä, tähän rakennetyyppiin ei ole laitettu ilmansulkukangasta (Kuva 18). Itäisenseinän toinen osa on vastaavanlainen kuin eteläseinän tyyppi (Kuva 19). Länsiseinällä on myös toinen osa seinää eristetty puukuidulla (US4A). Erona itäseinään on, että rakenteessa on vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukangas. Pohjoisseinä on rakennettu kahdesta 240 mm CLT-massiivipuuelementistä, joita ei ole eristetty (Kuva 19).



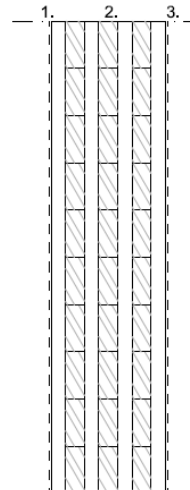
Kuva 16. 2. krs. Pohjakuva



Kuva 17. US1 eteläseinä 2. krs.



Kuva 18. US3A. itäseinä 2. krs.



Kuva 19. US2 pohjoisseinä 2. krs.

Testitalon katto on kolmeosainen koteloelementtikatto (Kuva 21). Yhdessä katon elementissä on käytetty höyrynsulkuna TKR-sively, ja lämmöneristeenä Parocin jäykkää kivivillaa. Toisessa elementissä on höyrynsulkuna vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukalvo Isover vario Extra. Kolmanteen elementtiin ei laitettu höyrynsulkua ollenkaan.

8.3 Lämmitetty tuulettuva alustila

Testitalon ryömintätila on suunniteltu, niin että ilmanvaihto tapahtuu koneellisesti. Alapohjan alapuolinen ryömintätila on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei ryömintätilaan kerääny vettä. Ryömintätilan on myös tuuletettava riittävästi eikä ilmatilankosteudesta saa olla haittaa rakenteiden toiminnalle, eikä kestävyydelle. Ryömintätilaan ei myöskään saa muodostua tuulettumattomia tiloja. Ryömintätilojen tuuletus toteutetaan yleensä tuuletusaukkojen tai -putkien kautta ulkoilmaan. Painovoimainen tuuletus tapahtuu katolle vietävien tuuletusputkien kautta, tuuletuksen voi myös suunnitella koneelliseksi. Jos ryömintätilan tuuletus toteutetaan sokkelin tuuletusaukkojen avulla, on niiden yhteispinta-alan oltava ainakin 4 ‰ ryömintätilan pinta-alasta. Tuuletusaukot on jaettava tasaisesti ulkoseinille, niin että koko ryömintätila tuulettuu. Ryömintätilan korkeuden tulee olla vähintään 0,8 m, testitalon ryömintätilan korkeus on 1,2 m [26, s. 31.] (Kuvat 22–24)



Kuva 22. Testitalon ryömintätila, eteläseinä.



Kuva 23. Ryömintätila, itäseinä.



Kuva 24. Ryömintätilan IV-kone.

8.4 Ikkunat, ovet ja tiivistys

Rakennuksessa on yhteensä 14 ikkunaa (kuva 25) ja kaksi ovea, joiden tiivistämiseen on käytetty erilaisia tiivistystapoja sekä tuotteita, joita nykyisin käytetään uudisrakentamisessa. Testitalon ikkuna-aukot ovat ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa toteutettu miltei samalla tavalla, lukuun ottamatta toisen kerroksen ikkunat 13 ja 14 (kuva 26).



Kuva 25. Testitalon ikkunoiden sijainnit

Taulukko 3. Ikkunoiden tiivistystuotteet rakennuksen eteläpuolella

Etelä ikkunat	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
1	Ikkuna 1: sisäpuolen tiivistys ILLBRUCK SP525 hybridipolymeeri saumausmassa. Eristys FM330 elastinen PU- vaahto. Ulkopuolinen tiivistys paisuvasaumanauha TP600
2	Ikkuna 2: sisäpuolen tiivistys ILLBRUCK ME508 membraani. Eristys ILLBRUCK FM330 elastinen PU- eriste. Ulkopuolinen tiivistys SP525/SP520 hybridipolymeeri saumausmassa
3	Ikkuna 3: ei erillistä sisäpuolista tiivistystä. Eristys ILLBRUCK FM330, elastinen PU- vaahto. Ulkopuolinen tiivistys ILLBRUCK SP525/SP520 hybridipolymeeri saumausmassa.
4	Ikkuna 4: pelkkä uretaanivaahto ILLBRUCK FM310, ei erillistä sisä- tai ulkopuolen tiivistystä
5	Ikkuna 5: sisäpuolen tiivistys ILLBRUCK SP525 hybridipolymeeri saumausmassa. Eristys ILLBRUCK FM330 elastinen PU- eristevaahto. Ulkopuolen tiivistys ILLBRUCK TP600 paisuvanauha
6	Ikkuna 6: sisäpuolen tiivistys ILLBRUCK membraani. Eristys ILLBRUCK FM330 elastinen PU- eristevaahto. Ulkopuolen tiivistys ILLBRUCK SP525/SP520 hybridipolymeeri saumausmassa
7	Ikkuna 7: ei erillistä sisäpuolista tiivistystä. Eristys ILLBRUCK FM330 elastinen PU- eristevaahto. Ulkopuolinen tiivistys ILLBRUCK SP525/SP520 hybridipolymeeri saumausmassa
8	Ikkuna 8: pelkkä uretaanivaahtoeristys ILLBRUCK FM310, ei erillistä sisä- tai ulkopuolen tiivistystä.

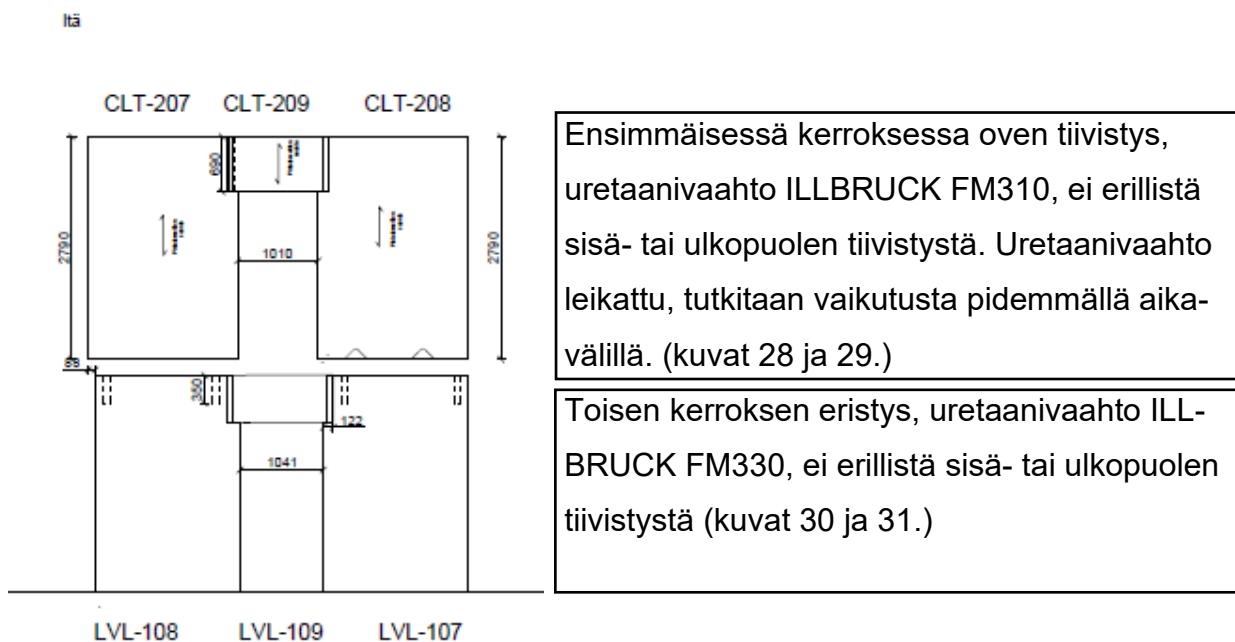
Taulukko 4. Ikkunoiden tiivistystuotteet rakennuksen pohjoispuolella

Pohjoinen ikkunat	9, 10, 11, 12, 13, 14
9	Ikkuna 9: ei erillistä sisäpuolista tiivistystä. Eristys ILLBRUCK FM330 elastinen PU- eristevaahto. Ulkopuolen tiivistys ILLBRUC SP520 hybridipolymeeri saumaussmassa
10	Ikkuna 10: sisäpuolen tiivistys ILLBRUCK ME508 membraani. Eristys ILLBRUCK FM330 elastinen PU- eristevaahto. Ulkopuolinen tiivistys ILLBRUCK TP600 paisuvanauha
11	Ikkuna 11: asennettu huullostaa vasten, eristeenä FM330 elastinen PU-vaaho. Sisäpuolen karmin ja CLT:n rajassa SP525
12	Ikkuna 12: lasielementti asennettu jyrskittyä huullostaa vasten, välissä silikoni kokolasin kierrolla. Sisäpuolella silikoni lasin ja CLT:n rajassa. Asennettu elementtiturvakiiloilla.
13	Ikkuna 13: pelkkä uretaanivaahoeristys ILLBRUCK FM330, ei erillistä sisä- tai ulkopuolen tiivistystä
14	Ikkuna 6: sisäpuolen tiivistys ILLBRUCK ME500 membraani. Eristys ILLBRUCK FM330 elastinen PU- eristevaahto. Ulkopuolen tiivistys ILLBRUCK TP600 paisuvanauha

Ikkuna 11, on asennettu huullostaa vasten, eristeenä FM330 elastinen PU-vaaho. Sisäpuolen karmin ja CLT:n rajassa SP525. Ikkuna 12 on lasielementti, joka on asennettu jyrskittyä huullostaa vasten, välissä silikoni kokolasin kierrolla. Sisäpuolella silikoni lasin ja CLT:n rajassa. Asennettu elementtiturvakiiloilla ja muutamassa kohtaa liimamassa tartunnat (kuva 26).



Kuva 26. 2krs. Ikkunat 11 ja 12



Kuva 27. Testitalon oviaukot



Kuva 28. 1krs. oven tiivistys



Kuva 29. 1krs. oven tiivistys. PU-vaaho leikattu.



Kuva 30. 2krs. oven tiivistys



Kuva 31. 2krs. Elastinen PU-vaaho ovessa.

8.4.1 Testitalon ilmanvaihto

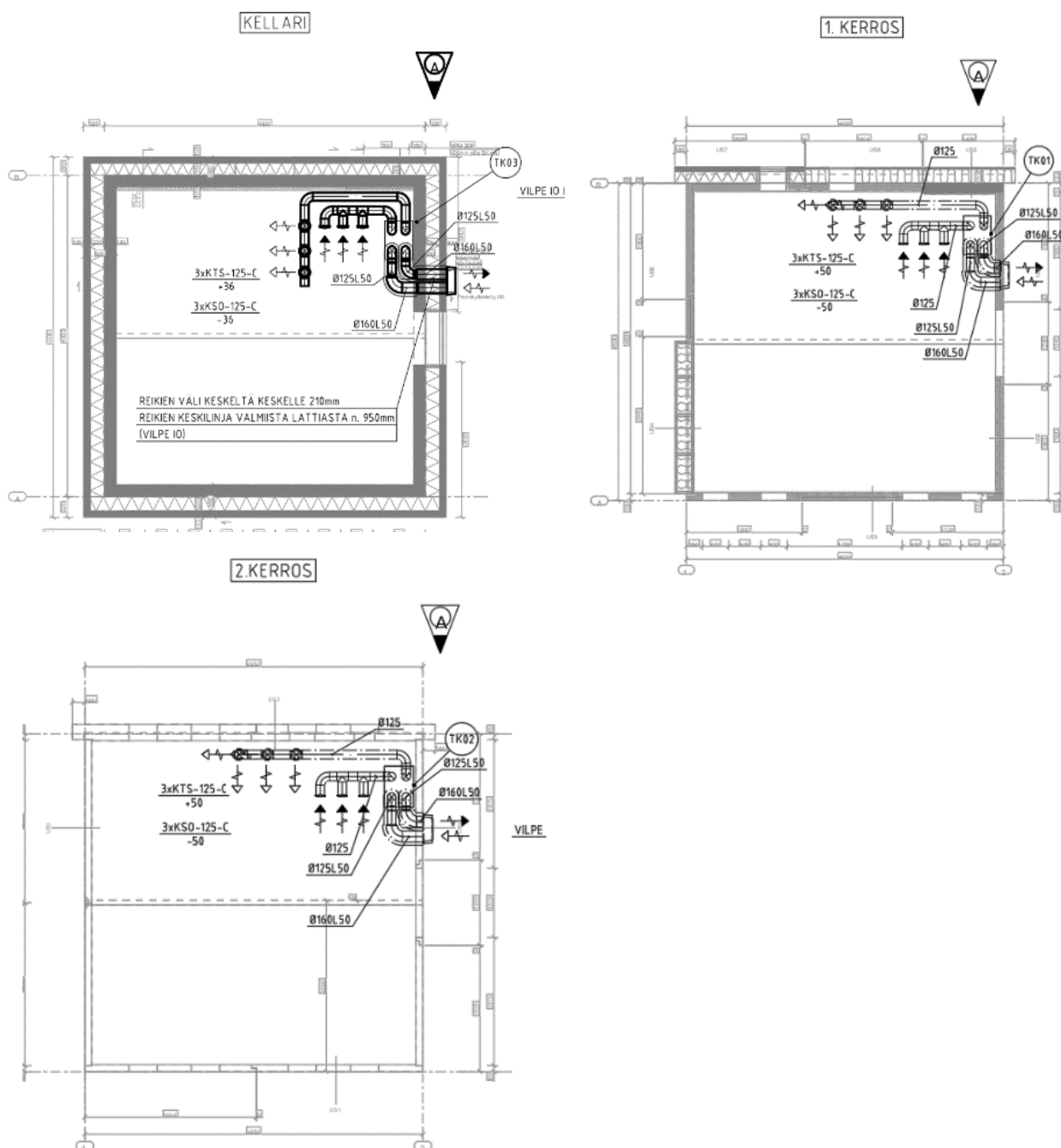
Testitalon ilmanvaihto on suunniteltu siten, että jokaiseen kerrokseen on asennettu oma IV-laitteisto, joiden avulla kerrosten olosuhteita pystytään säätämään tarvittaessa erilaisiksi. Ilmanvaihtokoneet ovat Vallox 99 MV-mallia, jossa on sisäänrakennetut RH- ja Co₂-anturit (Kuva 32). Ilmanvaihtokoneiden ohjausta voidaan tehdä joko mukana tulevalla säätimellä, tai MyVallox Cloud-pilvipalvelussa internet-yhteydellä. Pilvipalvelussa on mahdollista myös saada yhteys tekniseen tukeen etänä sekä tehdä automaattinen päivitys.



Kuva 32. Vallox 99 MV (lähde Vallox)

8.4.2 Ilmanvaihdon käynnistys

Testitalon ilmanvaihtokoneet käynnistettiin 10.10.2023, ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa tiiveysmittausten jälkeen. Koneet olivat tehdas säädöillä tulo ja poistoilma 50 %, eli noin 50 l/s, ilmanvaihdon ollessa päällä jonkin aikaa talossa huomasi aistinvaraisesti sisäilmanlaadun parantuneen.



Kuva 33. Testitalon IV- kone suunnitelmat.

9 SENSORIJÄRJESTELMÄ

Testitaloon on asennettu erilaisia sensorijärjestelmiä, jotka mittaavat jatkuvasti rakennuksen lämpötilaa, kosteutta sekä sisäilman olosuhteita (Taulukko 5).

Tiedot tallentuvat pilvipalveluun, josta voi seurata reaaliaikaista dataa. Palvelusta voi myös tarkastella tietyn ajanhetken mittaustuloksia.

Taulukko 5. Anturit taulukoituna.

Anturi	Mitattavat parametrit	Lukumäärä [kpl]
ELSYS EMS DOOR	Sensori oven asennon, lämpötilan, kosteuden ja kiihtyvyyden mittaamiseen.	3
ELSYS ELT- 2- HP	Sisäänrakennetut sensorit lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaamiseen.	12
IOTSU® L3 DP01	Paine-eron mittaus	10
IOTSU® AQ09	Ilmankosteus, lämpötila, pienhiukkaset PM2.5 ja PM10, sekä VOC arvoja.	3
Milesight- AM319 HCHO	Ilmankosteus, lämpötila, pienhiukkaset PM2.5 ja PM10, hiilidioksidi, HCHO, valon määrä, liikkeen tunnistus.	1
Milesight- EM300	EM300 mittaa lämpötilaa ja suhteellista kosteutta, lämpötilan mittausalue, -30°C -+70°C, kosteuden mittausalue 0–100 %	1

9.1 Milesight-anturit

Testitalossa on Milesight-antureita ensimmäisessä kerroksessa kaksi kappaletta, Milesight-AM319 HCHO ja Milesight-EM300. AM319 on sisätilasensori, joka mittaa sisäilman olosuhteita, kosteutta, lämpötilaa, ilmanpainetta ja hiilidioksidia. Laite mittaa myös TVOC ja formaldehydipitoisuuksia sekä pienhiukkasten määrää ilmassa. Laitteessa on myös PIR-sensori, joka havaitsee liikkeen (Kuva 35). EM300 mittaa lämpötilaa ja suhteellista kosteutta, lämpötilan mittausalue, -30°C -+70°C, kosteuden mittausalue 0–100 % (kuva 34). [13; 14.]



Kuva 34. Milesight EM300



Kuva 35. Milesight AM319 HCHO

9.1.1 ELSYS-anturit

ELSYS EMS DOOR-anturiin on rakennettu sisään antenni sekä sensorit kosteuden, lämpötilan, kiihtyvyyden ja oven asennon mittaukseen. Anturilla voidaan myös havaita vesivuotoja esimerkiksi astianpesukoneen alta, anturiin asennettavilla "sensorijaloilla". [15, s. 7] Testitaloon on asennettu ELSYS EMS-anturit 1 ja 2 kerroksen oviin, sekä pohjakerroksen huoltoluukkuun.



Kuva 36. ELSYS EMS DOOR



Kuva 3. ELSYS ELT- 2- HP

ELSYS ELT-2-HP, on ulko- ja sisäkäyttöön tarkoitettu anturi, joka mittaa analogisia ja digitaalisia signaaleja. Anturissa on myös sisäänrakennettuna ilmanpaineen, asennon, lämpötilan ja kosteuden mittaamiseksi tarkoitettut sensorit. Käyttölämpötila on välillä $-40^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$ ($+85^{\circ}\text{C}$). [15, s. 9.]

IOTSU® anturit



Kuva 38. IOTSU® L3 DP01

IOTSU® L3 DP01 rakennuksen paine-erojen mittaukseen tarkoitettu langaton laite (Kuva 38). Laite käyttää maailman laajuisista LoRaWAN® verkkoa, laitteen akun kesto on jopa 5 vuotta. Laitteen tarkkuus $\pm 3\%$ lukemasta, < 0.1 Pa. [17.] Anturit on asennettu testitaloon molempiin kerrokseen sekä jokaiselle ilmasuunnalle.



Kuva 39. IOTSU® AQ09

IOTSU® AQ09, on monitoiminen sisäilmanmittaukseen tarkoitettu laite, jonka sisään asennetut sensorit mittaavat, pienhiukkasia, hiilidioksidia, kosteutta, lämpötilaa sekä TVOC-pitoisuuksia ilmassa. [16.] Sisäilmanlaatua mittaavat anturit on asennettu jokaiseen kerrokseen.

9.1.2 3K-anturit



Kuva 4. Anturit seinärakenteissa

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun 3K- elektroniikkatehtaalla valmistetut anturit mittaavat lämpötilaa sekä kosteutta. Anturit on asennettu rakennuksen katto- sekä seinäelementteihin erikerrokseen, jotta saadaan seurattua rakenteen sisäisiä olosuhteita (Kuva 40).

9.1.3 WIISTE-anturit



Kuva 41. Wiiste WM1- WAN anturi



Kuva 5. Wiiste SH1- WAN. Kuva, Wiiste Oy.

Testitalossa on Wiisteen langattomia sensoreita (Kuvat 41 ja 42), jotka toimivat LoRaWAN verkossa. SH1- WAN anturi on tarkoitettu betonin lämpötilan ja kosteuden mittaamiseen. Anturi on tarkoitettu asennettavaksi betoniin valun aikana. Anturi toimii langattomasti ja lähettää tiedot verkkoon, joten betonin kosteutta ja lämpötilaa saadaan seurattua reaaliajassa. SH1- WAN anturiin saa laitettua olosuhde hälytykset. Anturi hälyttää myös pariston tarpeen vaihdosta. Paristojen kesto on noin 10 vuotta, jonka jälkeen tiedot saadaan luettua käsilukulaitteella, laitteen avulla tiedot saadaan siirrettyä relia pilvipalveluun.

Relia on pilvipalvelu, joka mahdollistaa tietojen arkistoinnin, raportoinnin, jakamisen sekä suunnitelmien viennin pohjakuvien päälle.

Betoni- LVL-hybridielementteihin on asennettu osa antureista jo tehtaalla valmistusvaiheessa. Elementissä HYB- 105 on betoni ulkokuoressa 35 mm syvyydessä SH1- WAN sensori. Myös elementeissä HYB- 106 ja BET- 110 on rappaukseen asennettu SH1- WAN anturit.

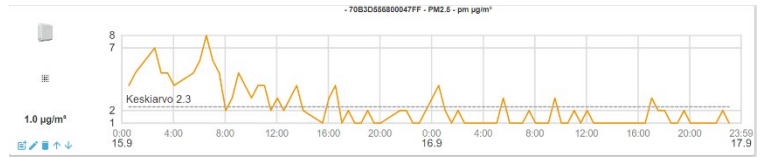
Wiisteen WM1- WAN- kosteusmittari on tarkoitettu mittaamaan puun kosteutta ja lämpötilaa, jonka lisäksi voidaan mitata ympäröivän ilman lämpötila ja kosteuspitoisuuksia. Anturissa on mittaelektroni ruuvit, jotka voidaan asentaa eri syvyyteen. Mittaus syvyys anturissa 15–70 mm [18]

10 MITTAUKSET

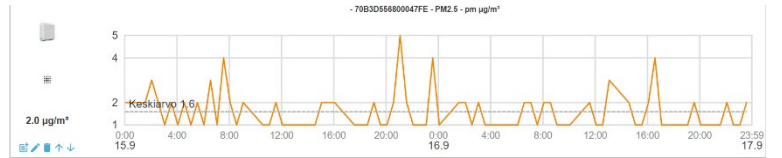
Elementtien pystytyksen jälkeen huhtikuun 2023 alusta testitalon ensimmäiseen kerrokseen asennettiin mittaamaan Milesight EM300 ja Milesight AM319-HCHO-anturit (kuvat 34, 35 ja 43). Milesight AM319- HCHO-anturi alkoi antamaan dataa 27.4.2023 alkaen, jolloin varsinaisessa rakennusprojektissa olisi sisävalmistusvaiheen työt käynnissä. Vaiheen kesto on yleensä karkeasti 2–3 kuukauden välillä, riippuen olosuhteista. Elokuun lopulla 2023 saatiin ilmanlaatumittaukset yläkertaan sekä alatilaan. Testitalossa ei ollut kesän aikana lainkaan ilmanvaihtoa päällä, joka varmasti vaikuttaa tiiviissä uudisrakennuksessa mahdollisiin haitta-ainepitoisuuksiin. Talo oli siis kesän ja alkusyksyn ajan vaiheessa, jossa valmisteltaisiin rakennuksen sisätiloja ja pystymme kaupallisilla antureilla seuraamaan suuntaa antavia olosuhteita. Lokakuussa 2023, saimme Itä-Suomen yliopiston mukaan mittauksiin. Ympäristö- ja biotieteen laitos, luonnontieteiden, metsätieteiden ja tekniikan tiedekunnasta yliopistonlehtori Marko Hyttinen sekä opiskelija Simo Erkko tekivät heidän laitteistoillaan VOC- ja hiukkasmittauksia sekä testitalon tiiveysmittaukset, mittauksissa pääsin olemaan mukana. Näiden tulosten perusteella voimme vertailla kaupallisten sensoreiden dataa, heidän tekemiin laboratorioanalyysiin.



Kuva 43. Milesight EM300
1krs. pohjoisseinä.



Kuva 6. IOTSU® AQ09 Alatila, mittausdataa
ajalla 15- 17.9.2023.



Kuva 7. IOTSU® AQ09 2krs. Mit-
tausdataa ajalla 15- 17.9.2023.

Mittausdataa sensorimaailman pilvipalvelusta ajalla 15- 17.9.2023. PM2.5 ja PM10 pitoisuudet (Kuvat 44 ja 45).

10.1 Rakennuksen ilmatiiveysmittaus

Ilmanvuotoluvulle q_{50} on määritelty arvo, joka saa enintään olla $4,0 \text{ (m}^3/\text{(h m}^2\text{))}$. Kyseisen luvun voi ylittää tapauksessa, jos rakennuksen käyttöön perustuvat rakenteelliset ratkaisut huonontavat merkittävästi ilmanpitävyyttä. Jos ilmanpitävyyttä ei ole osoitettu mittauksin, käytetään ilmanvuotolukuna $4,0 \text{ (m}^3/\text{(h m}^2\text{))}$. [21]



Kuva 46. Paine-
nekoelaitteiston
puhallin.



Kuva 47. Paineen-
mittauslaite.



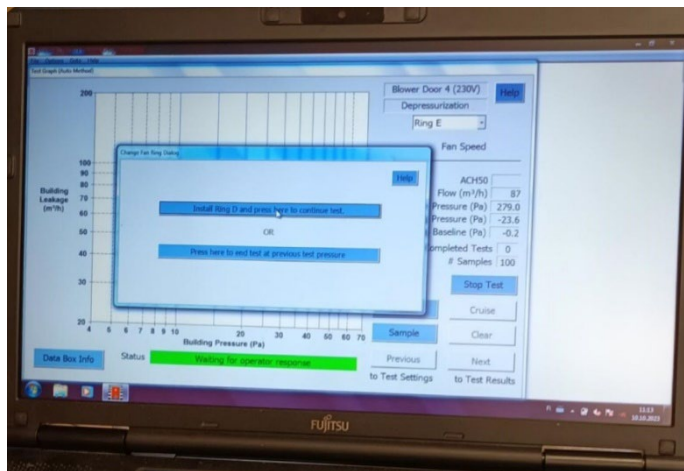
Kuva 48. 1krs. Paine-
nekoelaitteisto, sul-
kurenkaat. Mittaus



Kuva 49. 1krs. paine-
nekoelaitteisto. Mit-
taus nro.1.

10.1.1 Testitalon ilmatiiveysmittaus

Testitalon rakennusvaipan ilmanvuotoluvun mittaus tehtiin painekoelaitteistolla, 50 Pa paine-erolla, alipaine ulkoilmaan verrattuna. Mittaukset tehtiin ensimmäiseen ja toiseen kerrokseen 10.10.2023. Ilmanvaihtokoneissa tulo- ja poistoilmakanavat suljettiin tiiviisti muovin ja teipin avulla sekä tarkistettiin että ikkunat ovat suljettu. Paineekoelaitteisto asennettiin ulko-oveen ja tarkistettiin tiiveys. Mittausohjelmistoon syötettiin tarvittavat lähtötiedot, kuten ulko- ja sisäilman olosuhteet sekä mitattavan kohteen tilavuustiedot. Puhaltimessa on yhteensä viisi erikokoista sulkurengasta, joista valikoidaan tilan mukaisesti sopivan kokoiset renkaat. Ensimmäisen kerroksen mittauksessa kokeiltiin ensin laitteen puhaltimessa sulkurengasta C, kuitenkin ohjelmisto pysäytti mittauksen ja pyysi pienempää rengasta. Koska C- renkaalla ei pystytty saamaan haluttuja paine-eroja, päädyimme lopulta pienimpään E vaihtoehtoon (Kuva 48).



Kuva 50. Tietokoneohjelmisto TECTITE

Taulukko 6. 1 krs. Tilavuus- ja olosuhdetiedot

Ensimmäinen kerros, lähtötiedot pvm. 10.10.2023			
Huoneen tilavuus [m ³]	Ulkoseinän piiri [m]	Seinät [m ²]	Lattia ja yläpohja [m ²]
59	22	59	44
Olosuhteet mittaushetkellä (Klo. 10–12.00)			
Lämpötila/ RH%	Ts. 17 °C / RHs. % 51,5 %		Tu. 1 °C / RHu % 89 %
Paine			Pu. 1013,6 [hPa]
Tuulen nopeus.			2,3 [m/s]

Taulukko 7. 2 krs. tilavuus ja olosuhdetiedot

Toinen kerros, lähtötiedot 10.10.2023			
Huoneen tilavuus [m ³]	Ulkoseinän piiri [m]	Seinät [m ²]	Lattia ja yläpohja [m ²]
63	22	51	45
Olosuhteet mittaushetkellä (Klo. 14–15.00)			
Lämpötila/ RH%	Ts 18 °C RHs % 55,8 %		Tu 3,9 °C RHu % 80 %
Paine			Pu.1012,2 [hPa]
Tuulen nopeus.			3 [m/s]

10.1.2 Ilmanvaihdon käynnistys

Testitalon ilmanvaihtokoneet käynnistettiin 10.10.2023, ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa tiiveysmittausten jälkeen. Koneet olivat tehdas säädöillä tulo ja poistoilma 50 %, eli noin 50 l/s. Ilmanvaihdon ollessa päällä jonkin aikaa talossa huomasi aistinvaraisesti sisäilmanlaadun parantuneen. Seuraavana päivänä teimme suuntaa antavat mittaukset, joilla saimme selvitettyä kerrosten ilmanvaihtokertoimet IV-koneille $n(1/h)$. Meillä oli käytössä ilmanpaine-eromittauksiin tarkoitettu kannettava paine-eromittari GD- 10 L (ilman Pitot-putkea), jolla mitattiin poisto- ja tuloilmaventtiileistä paineet (kuva 51). Ilmanvaihto oli vähän turhan tehokas huoneiden neliömäärään sekä käyttöön nähden. Saimme ilmanvaihtoluvuksi n. 2,7 vaihtoa tunnissa. Annoimme koneiden kuitenkin olla pari päivää tehdasasetuksilla, jotta näkisimme tämän vaikutukset sisäilmanlaatuun.



Kuva 51. Poistoilmaventtiili. Paine-eron mittaus GD- 10 L-laitteella.

Taulukko 8. Mittaustuloksia

Alakerrasta mitatut paineet, pois- toilma	
[l/s] KSO- 125 (taulukosta)	
22 [Pa]	15 l/s
22 [Pa]	15 l/s
29 [Pa]	18 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 48 l/s
0 mm	
0 mm	
0 mm	

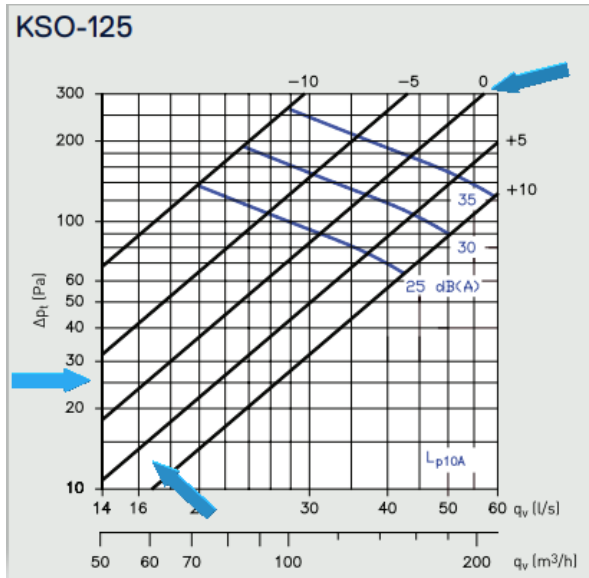
Alakerrasta mitatut paineet, tu- loilma	
[l/s] KTS- 125 (taulukosta)	
21 [Pa]	12 l/s
21 [Pa]	12 l/s
25 [Pa]	10 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 42 l/s
9 mm	
9 mm	
9 mm	

Kerroksessa yksi, ilma vaihtuu n. 2,7 kertaa tunnissa, näillä asetuksilla.

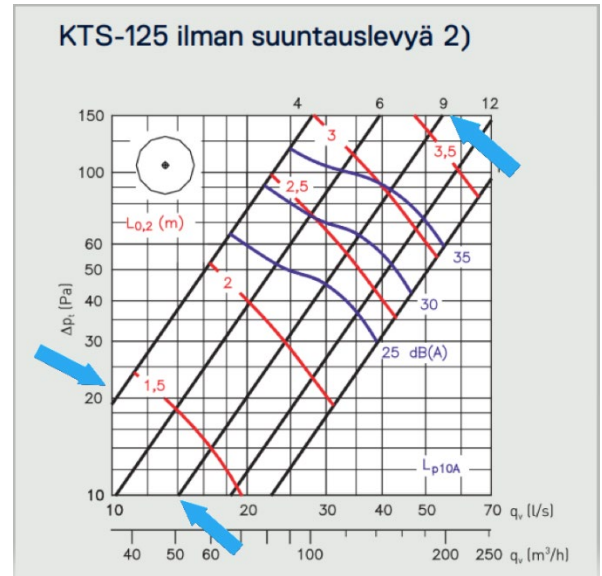
Yläkerrasta mitatut paineet, pois- toilma	
[l/s] KSO- 125 (taulukosta, kuva 38.)	
21 [Pa]	15 l/s
21 [Pa]	15 l/s
25 [Pa]	16,3 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 46,3 l/s
0 mm	
0 mm	
0 mm	

Yläkerrasta mitatut paineet, tu- loilma	
[l/s] KTS- 125 (taulukosta, kuva 39.)	
17 [Pa]	15 l/s
18 [Pa]	15 l/s
21 [Pa]	15 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 45 l/s
7 mm	
7 mm	
7 mm	

Kerroksessa kaksi, ilma vaihtuu n. 2,6 kertaa tunnissa näillä asetuksilla.



Kuva 52. Säätokäyrästä (mukaillen onninen, pois-toilma käyrästä)



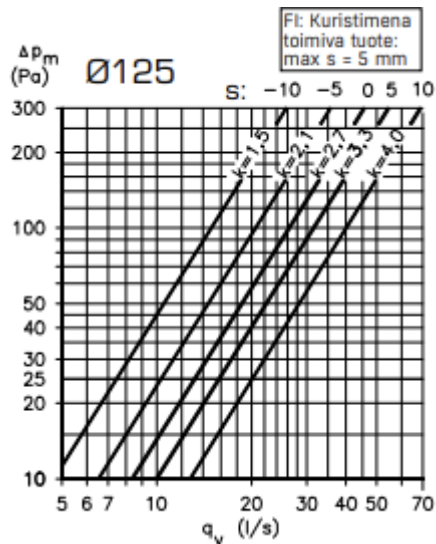
Kuva 53. Säätokäyrästä (mukaillen onninen, tu-loilma käyrästä)

10.1.3 Ilmanvaihtokoneen säädöt

Ilmanvaihtokoneiden manuaalinen säätäminen tehtiin 13.10.2023, kun koneet olivat olleet päällä parinpäivän ajan. Koneet säädettiin 20 % teholle ensimmäisessä sekä toisessa kerroksessa, ennen säätöjä otin VOC-näytteen AirChek 3000 pumpulla Tenax-putkeen, jotta näkisimme koneen käynnissä oloajan vaikutukset sisäilmanpäästöihin. Jatkoimme näytteiden keräämistä lokakuun 30 päivään saakka, otin näytteet aina alku- ja loppuviikosta. Marraskuun alussa Itä-Suomen yliopiston toimesta otettiin lisää VOC- sekä pienhiukkasnäytteitä. Katsoimme myös paine-erot ilmanvaihtokoneiden kanavista paine-eromittalaitteella, johon oli liitettynä kuparikapillaariputki (kuva 54) teimme samalla uudet tiiveysmittaukset talossa. Käytimme ilmanvaihtoluvun määrittämiseen apuna k-kertoimia sekä taulukkoja (Kuva 55). Ensimmäisenä tarkistimme ilmanvaihtoventtiilien säädöt rakotulkkia apuna käyttäen. Mitaksi saimme venttiilien säädöille 0 mm, jonka jälkeen saimme määriteltyä säätökertoimen $k = 2,7$ (kuvat 52–56).



Kuva 54. Paine-eromittalaite



Kuva 55. Poistoilmakäyrästä (FläktGroup)



Kuva 56. Halton-rakotulkki.

Ilmavirtojen laskentaan käytimme kaavaa:

$$q = k \sqrt{\Delta P_m}$$

jossa,

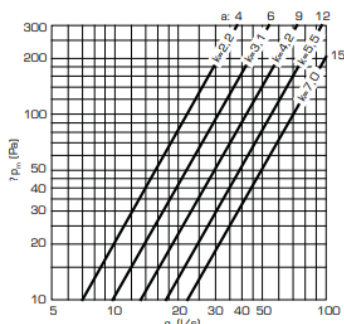
q= ilmavirta [l/s]

k= säätökerroin (taulukosta)

ΔPm= mittauspaine-ero

Paine-erot muutetaan säätökertoimen avulla litraa per sekunti ja lasketaan yhteen ja tämän avulla saadaan laskettua suuntaa antava ilmanvaihtoluku.

KTS-125-C



Kuva 57. Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas, tuloilmaventtiilille. (mittarimato/flaktwoods)

KTS-125-C			
a (mm)		06,2006	
	4	2,0	1,9
6	2,6	2,6	3,1
9	3,3	3,4	4,2
12	3,8	4,1	5,5
15	4,4	4,4	7,0

Kuva 58. Säätökertoimet tuloilmaventtiili (mittarimato/ flaktwoods)

Taulukko 9. Mittaustuloksia.

Alakerrasta mitatut paineet, pois- toilma 8.11.2023	
[l/s] KSO- 125 (taulukosta, kuvat 38, 42.)	
Säätökerroin k=2,7	
20 [Pa]	12 l/s
19 [Pa]	11,8 l/s
22 [Pa]	13 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 36,8 l/s
0 mm	
0 mm	
0 mm	

Alakerrasta mitatut paineet, tuloilma 8.11.2023	
[l/s] KTS- 125 (taulukosta, kuvat 43 ja 44.)	
Säätökerroin k=4,2	
-6 [Pa]	10,3 l/s
-4 [Pa]	8,4 l/s
-7 [Pa]	11,1 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 29,8 l/s
9 mm	
9 mm	
9 mm	

Kerroksessa yksi näillä asetuksilla ilma vaihtuu n. 2,2 kertaa tunnissa.

Mittausten ja laskelmiemme mukaan tulimme tulokseen, että testitalossa on vieläkin ilmanvaihtuvuus melko suuri tarpeeseen nähden. Tarkoituksena on tutkia pidemmän ajanjakson olosuhteita omakotitalorakennuksen säädöksiin perustuen, jossa ilmanvaihtoluvuksi on määritelty vähintään 0,5 vaihtoa tunnissa.

Taulukko 10. Mittaustuloksia

Yläkerrasta mitatut paineet, pois- toilma 8.11.2023	
[l/s] KSO- 125 (taulukosta, kuva 42.)	
Säätökerroin k= 2,7	
16 [Pa]	10,8 l/s
15 [Pa]	10,5 l/s
20 [Pa]	12 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 33 l/s
0 mm	
0 mm	
0 mm	

Yläkerrasta mitatut paineet, tuloilma 8.11.2023	
[l/s] KTS- 125 (taulukosta, kuvat 43 ja 44.)	
Säätökerroin k= 3,7	
-13 [Pa]	13 l/s
-12 [Pa]	12,8 l/s
-9 [Pa]	11 l/s
Venttiilit auki [mm]	Yhteensä: 36,8 l/s
7 mm	
7 mm	
7 mm	

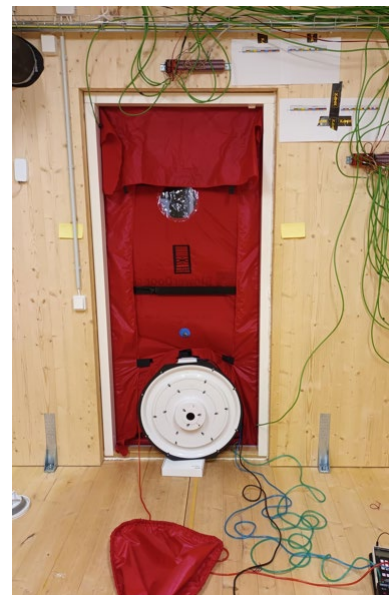
Kerroksessa kaksi näillä asetuk-
silla ilma vaihtuu n. 1,8 kertaa
tunnissa.

10.1.4 Testitalon toiset tiiveysmittaukset

Teimme testitalossa toiset tiiveysmittaukset 8.11.2023, tulokset olivat edelleen hyviä (Kuva 62). Ennen varsinaista mittausta sammutimme ilmanvaihtokoneet sekä tiivistimme ilmanvaihtokoneiden tulo- ja poistoilmaventtiilit puhallettavilla palloilla sekä asensimme mittauslaitteiston ulko-oveen (Kuvat 59–61).



Kuva 59. Tulo- ja poistoilmaventtiilien tiivistys



Kuva 60. Mittalaitteisto ulko-ovessa



Kuva 61. Paineistusmittalaite

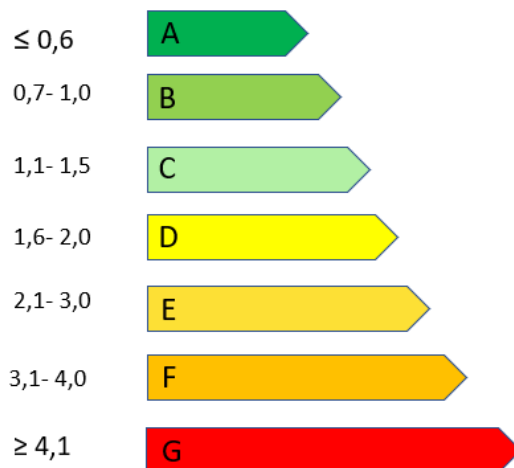
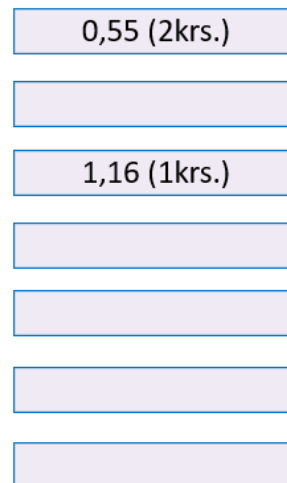
Taulukko 11. 1 krs. tilavuus ja olosuhdetiedot

Ensimmäinen kerros, lähtötiedot pvm. 8.11.2023			
Huoneen tilavuus [m ³]	Ulkoseinän piiri [m]	Seinät [m ²]	Lattia ja yläpohja [m ²]
59	22	59	44
Olosuhteet mittaushetkellä (Klo. 14–17.00)			
Lämpötila/ RH%	Ts 22 °C RHs % 32,9 %		Tu 2,63 °C RHu % 99 %
Paine			Pu.1004 [hPa]
Tuulen nopeus.			2,6 [m/s]

Taulukko 12. 2 krs. tilavuus ja olosuhdetiedot

Toinen kerros, lähtötiedot 8.11.2023			
Huoneen tilavuus [m ³]	Ulkoseinän piiri [m]	Seinät [m ²]	Lattia ja yläpohja [m ²]
63	22	51	45
Olosuhteet mittaushetkellä (Klo. 14–17.00)			

Tiiveysmittausluokitus

q₅₀- lukuMitattu q₅₀- luku

Mittaukset 10.10.2023

Kuva 62. Tiiveysmittausluokitukset (mukaillen www.rt.fi)Tiiveysmittausten tulokset.

10.2 VOC-mittaus

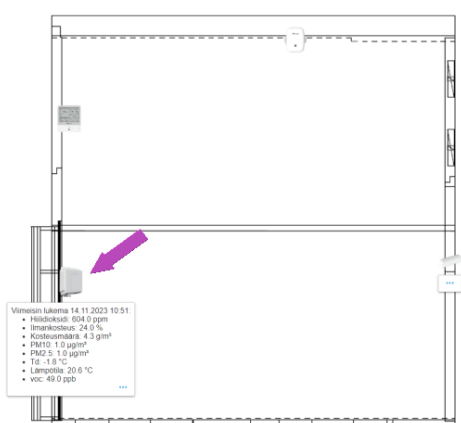
Testitalossa on jokaisessa kerroksessa jatkuvasti mittaavia kaupallisia sisäilman olosuhdemittalaitteita, jotka mittaavat esimerkiksi yhdisteiden kokonaispitoisuutta sisäilmassa, eli TVOC-pitoisuuksia (Kuvat 65 ja 66). Mittausdata sensoreista tallentuu sensorimaailmaan (Sensor World) pilvipalveluun, josta voidaan hakea dataa tietyltä ajanjaksolta taikka seurata reaaliajan olosuhteita. Kaupallisten sensoreiden lisäksi VOC-näytteitä kerättiin pumpuilla näyteputkiin, jotka analysoitiin laboratoriossa ja laskettiin tolueenivasteella, joten näytteiden tuloksia voidaan verrata asumisterveysasetuksen toimenpideraja-arvoihin. Toimenpideraja-arvona pidetään TVOC-arvo $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ja yksittäisellä yhdisteellä $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ellei asetuksessa ole toisin mainittu.



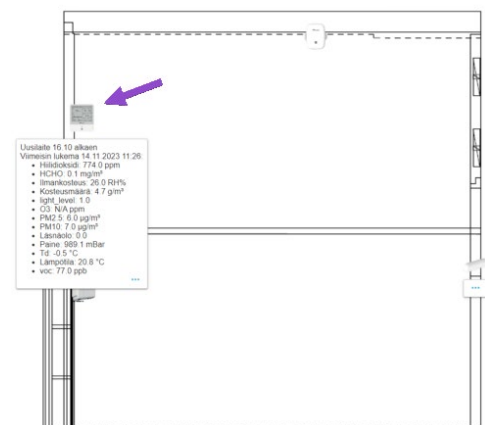
Kuva 63. Näytteenkeräys tuloilman kanavasta



Kuva 64. Näytteenkeräys 1krs. sisäilmasta



Kuva 65. 1krs. Pohjakuva. IOTSU® AQ09



Kuva 66. 1krs. Pohjakuva. Milesight AM319 HCHO

10.2.1 Pienhiukkasten mittaus

Testitalon olosuhdeantureissa on hengitettävien hiukkasten jatkuva mittaus, joka mittaa PM2.5 ja PM10 hiukkaspitoisuuksia sisäilmassa (Kuvat 65 ja 66). Samalla kun otettiin VOC-näytteitä, kerättiin myös hiukkasnäytteitä Itä-Suomen yliopiston mittauslaitteistoilla, näytteet analysoitiin laboratoriossa (Kuvat 67 ja 68). Hiukkasmaisille epäpuhtauksille on määritelty toimenpiderajoja sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen tutkimusasetuksessa pykälässä 19 §. PM10 pitoisuus sisäilmassa saa enintään olla $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ja PM2.5 enintään $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 tunnin mittauksen aikana. Toimenpideraja kahden viikon aikana laskeutuneessa teollisten mineraalikulujen pölyssä rajana pidetään $0,2 \text{ kuitua}/\text{cm}^2$. Pinnoille laskeutuneessa pölyssä asbestikuitua ei saa esiintyä, ja sisäilman asbesti pitoisuus ei saa ylittää $0,01 \text{ kuitua}/\text{cm}^2$. [21]



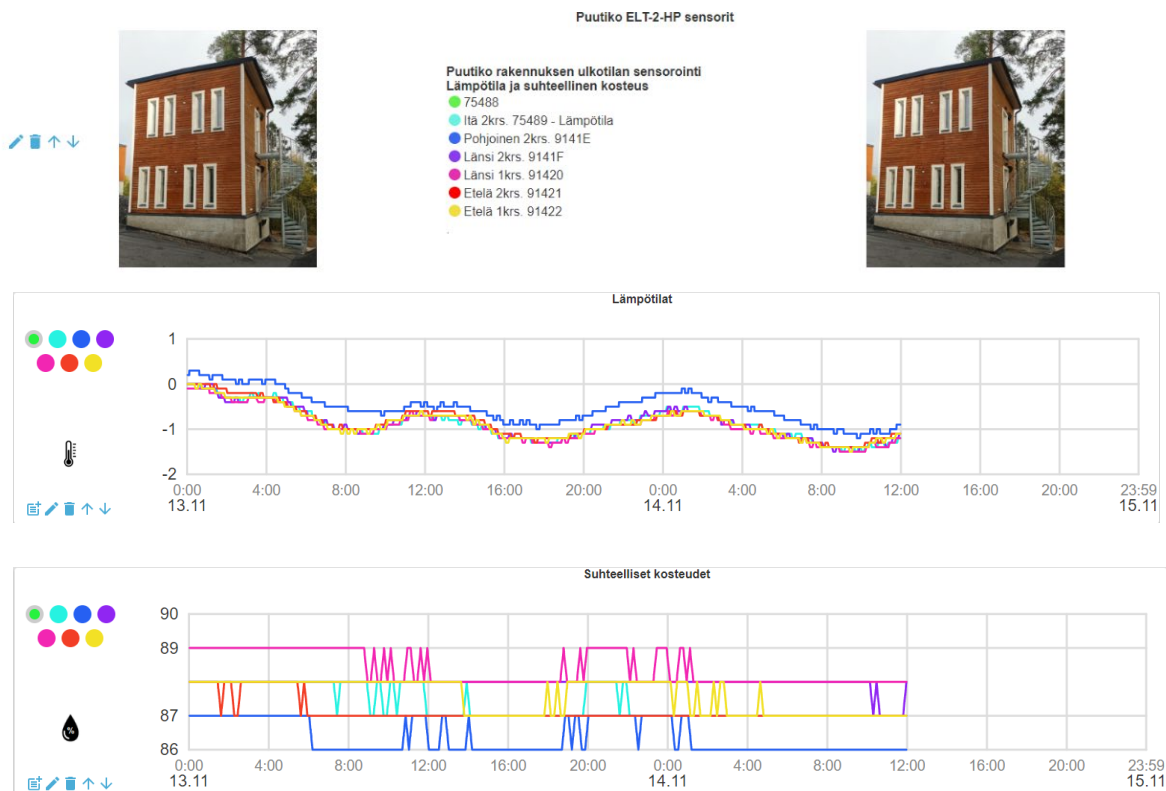
Kuva 67. Pienhiukkasten mitauslaite Dust-track 2



Kuva 68. Hiukkasten keräys näytekasetteihin

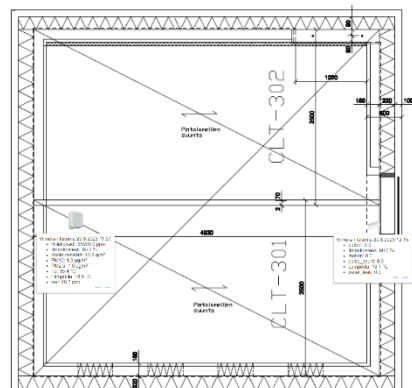
11 PILVIPALVELU

Testitalon antureiden data tallentuu automaattisesti pilvipalveluun, jossa on mahdollista tarkastella mittaustuloksia halutulla aikavälillä (Kuva 69). Sensorimaailmaan saadaan lisättyä eri valmistajien sensoreita, jolloin kaikki mittaustulokset on helposti saatavilla yhtenäisestä hallinta- ja seurantajärjestelmästä. Sensorimaailma (Sensor world), on yksi laskentapalvelut.fi/calculation-tools.com ohjelma-alustojen ohjelmistoista, jonka perusideana on ohjelmien keskinäinen integraatio ja tiedonvälitys. Sensorimaailman laitteet on tämän ansiosta linkitettävissä kaikkiin ohjelmistoalustan analysointiohjelmiin (esim. U-arvo, betonin kovettuminen, lämpövirta, kondensaatio, energian kulutus jne.) reaaliaikaisesti, joka mahdollistaa rakenteiden ja rakennusten analysoinnin 24/7, jopa vuosien mittaisilla seurantajaksoilla. Tällä hetkellä kytkettäviä ohjelmia on hieman yli 100 ja niitä kehitetään lisää asiakkaiden tarpeiden ja toiveiden mukaan. Palvelua ylläpitää D.O.F. Tech Oy, mutta mukana kehitystyössä on kolme eri ohjelmistoyritystä sekä kymmeniä laite- ja materiaalivalmistajia.

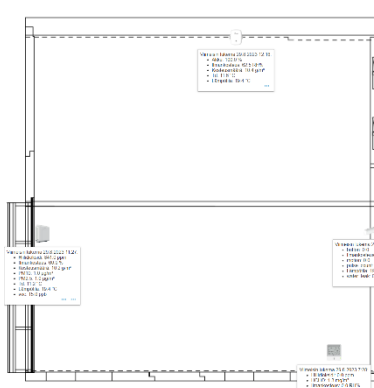


Kuva 69. Kuva Sensor World alustalta, testitalon ulkoilman olosuhteet.

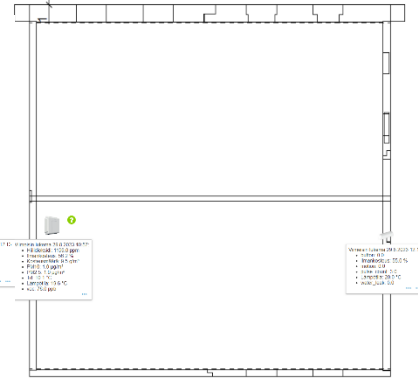
Sensor World alustalle saa esimerkiksi lisättyä kuvia, johon voidaan lisätä anturit sekä mittausnäkyvät (Kuvat 70–74).



Kuva 70. Testitalon ryömintätila.



Kuva 71. Testitalon 1krs. pohjakuva.



Kuva 72. Testitalon 2krs. pohjakuva.



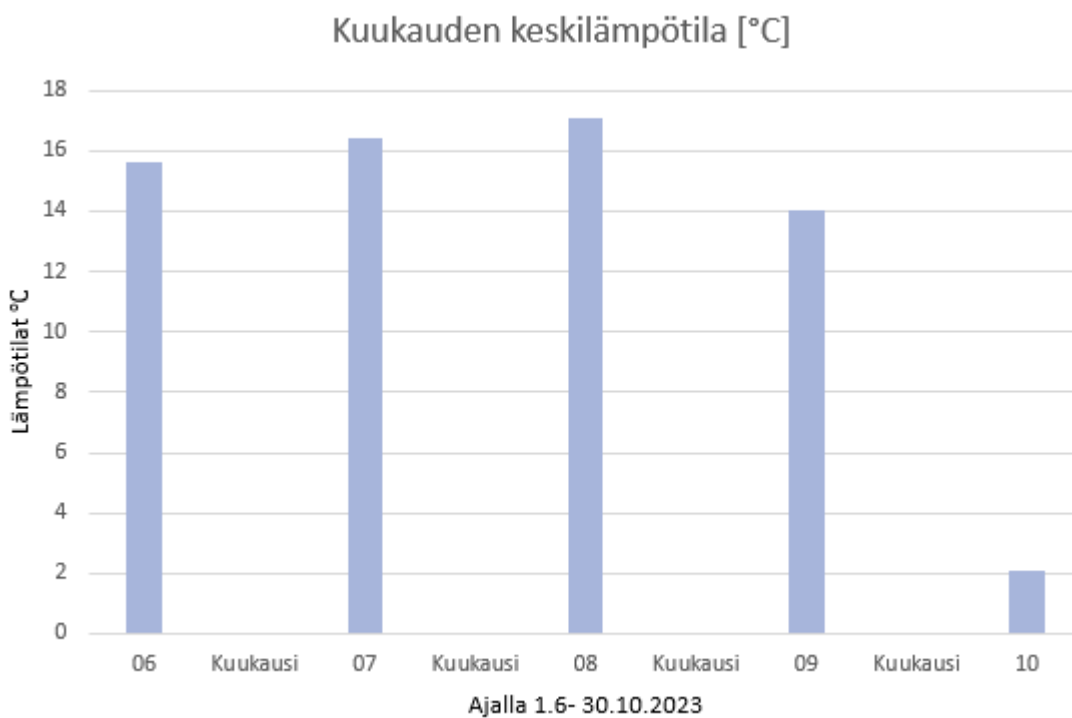
Kuva 73. Sensor World. Testitalon eteläseinä. ELT-2- HP-anturit.



Kuva 74. Testitalon eteläseinä

12 TULOKSET

Kesän aikana testitalossa oli Milesight-AM319 olosuhdemittalaite ensimmäisessä kerroksessa. Tämän mittalaitteen avulla voidaan tarkastella testitalon olosuhteita kesän ajalta, jolloin muita sensoreita ei vielä ollut talossa (Kuva 35, luku 9.1). Testitalossa IOTSU® AQ09-anturit aloittivat keräämään dataa 28.8.2023. Näiden mittalaitteiden tuloksia verrataan tässä opinnäytetyössä laboratorioanalyysiin. Kesä 2023 oli melko viileä ja sateinen, lämpimintä oli elokuussa keskilämpötilan ollessa 17,1 °C. Hellejaksolta ja sen vaikutuksista emissioihin ei tähän opinnäytetyöhön saatu kerättyä dataa.



Kuva 75. Lämpötilojen keskiarvot kesä- lokakuu 2023 (lähde ilmatieteenlaitos)

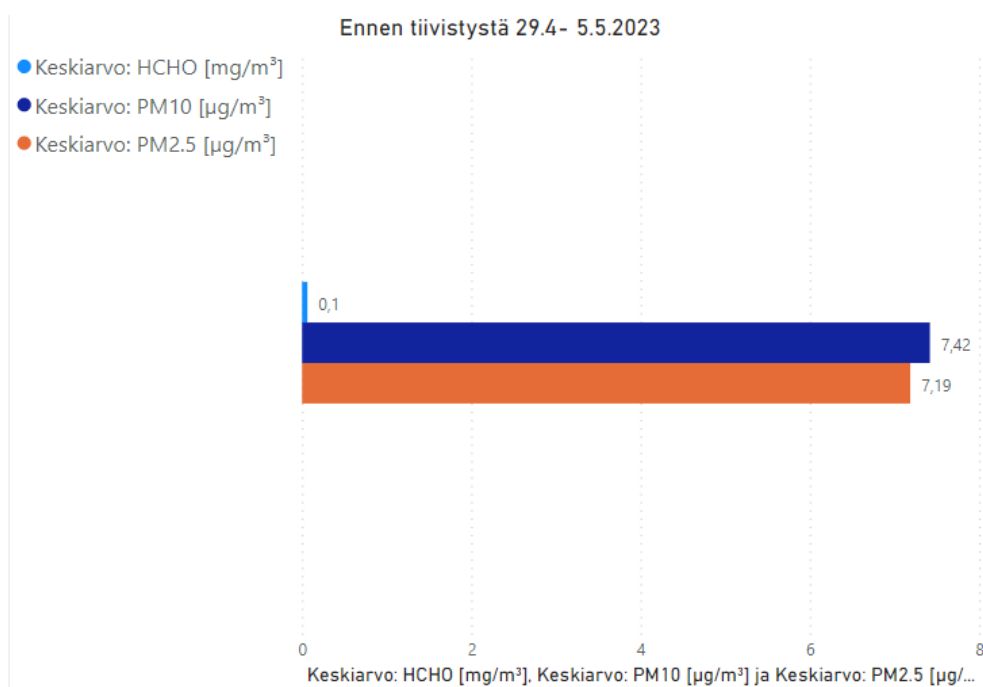
12.1 Aistinvaraiset havainnot

Aistinvaraisilla havainnoilla tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä poikkeavia hajuja sekä mahdollisia oireita, joita testitalossa kävijät ovat ilmaisseet kesän ja syksyn aikana. Havainnot kirjattuna alla olevassa taulukossa, ajanjaksolla 24.5- 10.10.2023 (Taulukko 13). Testitalon ikkunat asennettiin 4.4.2023 ja ovet saatiin asennettua 18.4.2023. Testitalo tiivistettiin 11.5.2023. Tiivistyksen jälkeen aistinvaraisten havaintojen perusteella huomasi testitalon sisäilman laadun heikkenevän. Voimakkaat kemialliset hajut tulivat esille. Kemiallinen pistävä haju säilyi talossa niin kauan, kunnes ilmanvaihto oli kytketty päälle. Omat kokemukset puoltavat havaittuja asioita, pidempi työskentely testitalossa aiheutti nenän vuotoa sekä päänsärkyä. Testitalossa ei ole kerrosten välillä ilmanvuotoreittejä, välipohjan kautta kulkevat sähkövedot on tiivistetty liimatiivistysmassalla. Kerroksiin kuljetaan ulko-ovien kautta.

Taulukko 13. Havaintoja testitalossa

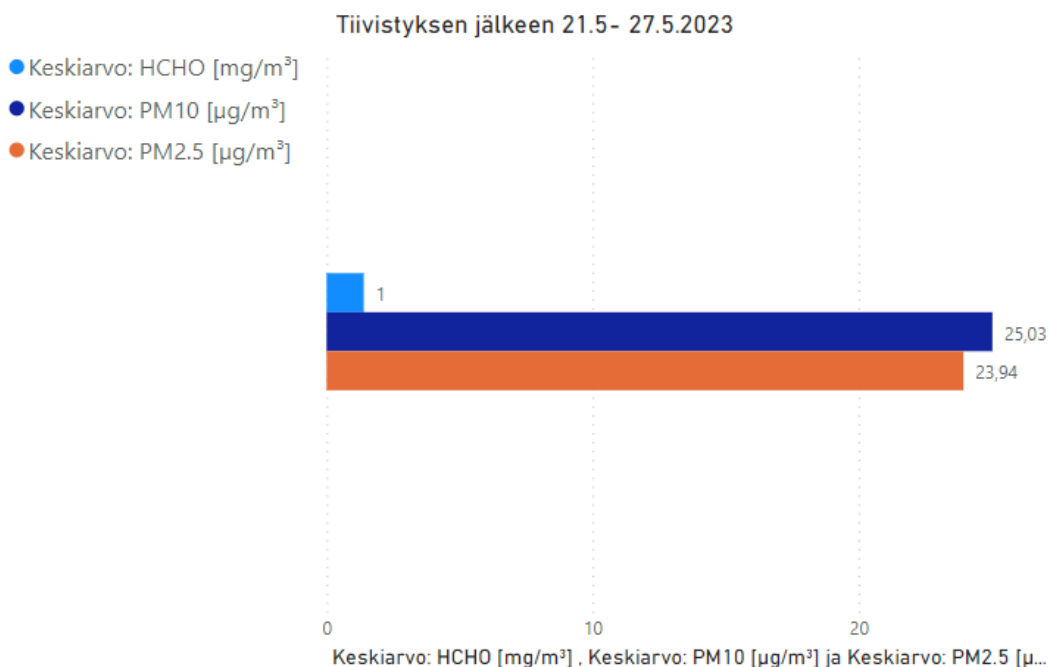
Aistinvarainen havainto	Havainnon luonne	Raportoitu oire
Epätavalliset tai voimakkaat hajut	kemiallinen pistävä haju. Hajua havaittu heti sisään tultaessa. Oireita havaittu, jos oltu pidempiä aikoja talossa.	Päänsärky, nenän vuotaminen, silmien ärsytys.
Hengitys ja hengitysilma	Tunkkaisuus Oireita havaittu, jos oltu pidempiä aikoja talossa.	Heikko olo, väsymys
Lämpötila ja kosteus	Kesällä lämpötila pysyi tasanaisena ja kosteus melko samoissa lukemissa. Lokakuu, ennen lämmitystä lämpötila tippui nopeasti alle 10°C	Lokakuu: sisäilma kylmä ja kostea ennen lämmitystä.

Viikkokohtaisista keskiarvoista testitalon ensimmäisessä kerroksessa voidaan todeta hiukkas- ja TVOC-arvojen nousseen tiivistyksen jälkeen. Ennen tiivistystä mittausjaksolla 29.4- 5.5.2023 keskiarvot olivat: PM2.5. 7,19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10. 7,42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja formaldehydi (HCHO) 0,1 mg/m^3 . TVOC-pitoisuuden keskiarvona oli 65,67 ppb (Kuva 76).



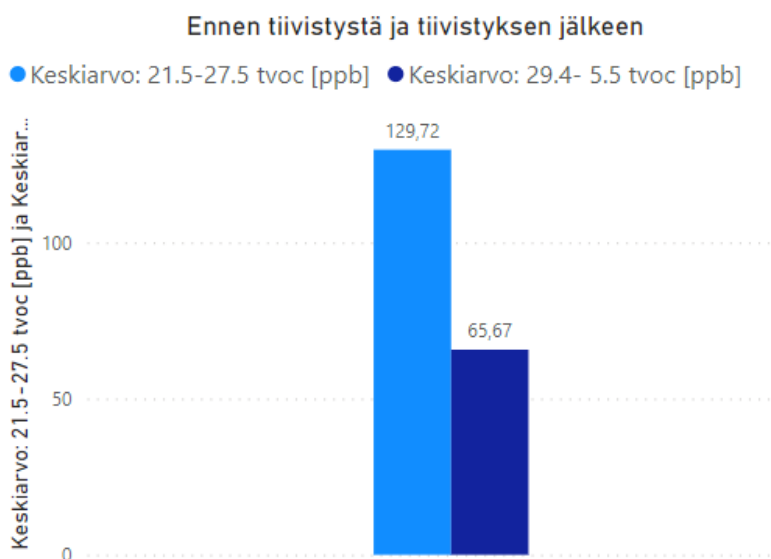
Kuva 76. Mittausten keskiarvot Milesight- AM319 HCHO

Tiivistyksen jälkeen mittausjaksolla 21.5- 27.5.2023 pitoisuuksien keskiarvot olivat: PM2.5. 23,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10. 25,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja formaldehydi (HCHO) 1 mg/m^3 . TVOC-pitoisuuden keskiarvona oli 129,72 ppb (Kuva 77).



Kuva 77. Mittausten keskiarvot Milesight- AM319 HCHO

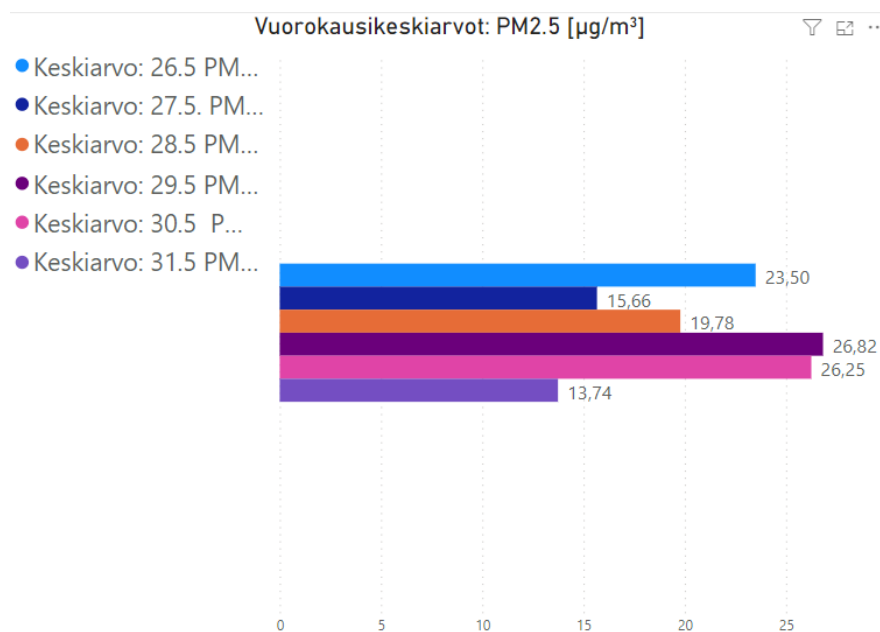
TVOC-pitoisuuksien keskiarvot ennen tiivistystä 65,67 ppb ja tiivistyksen jälkeen pitoisuus 129,72 ppb. Tiivistyksen jälkeen pitoisuudessa voidaan havaita nousua (Kuva 78).



Kuva 78. TVOC-pitoisuuksien keskiarvot Milesight- AM319 HCHO

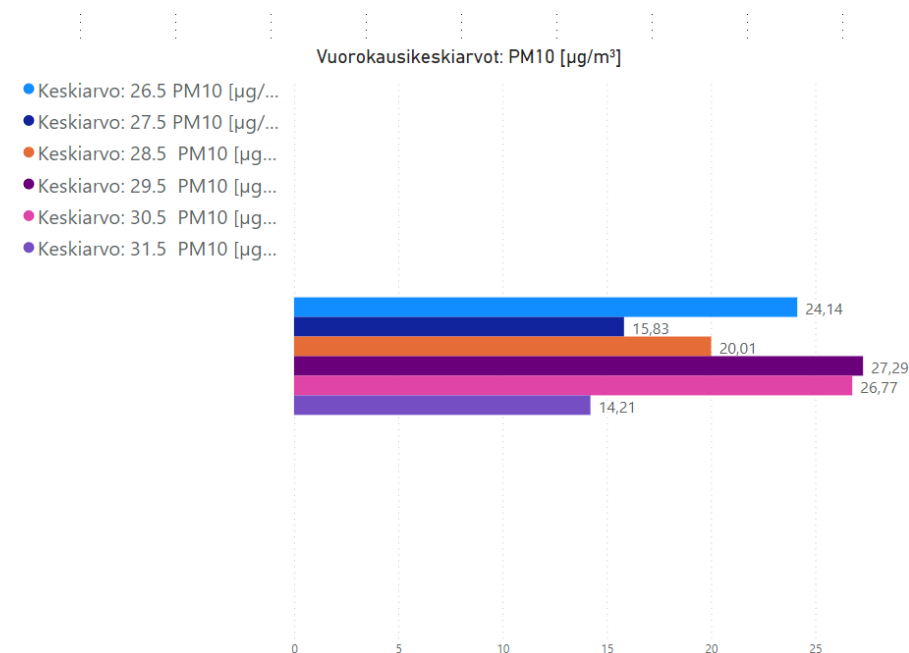
12.1.1 Pienhiukkaset PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ja TVOC- pitoisuudet [ppb]

Vuorokausikohtaiset keskiarvot ylittyivät PM2.5 pitoisuuksien osalta mittausjakson 26.5- 31.5.2023 välillä, kahden vuorokauden ajalla (Kuva 79).



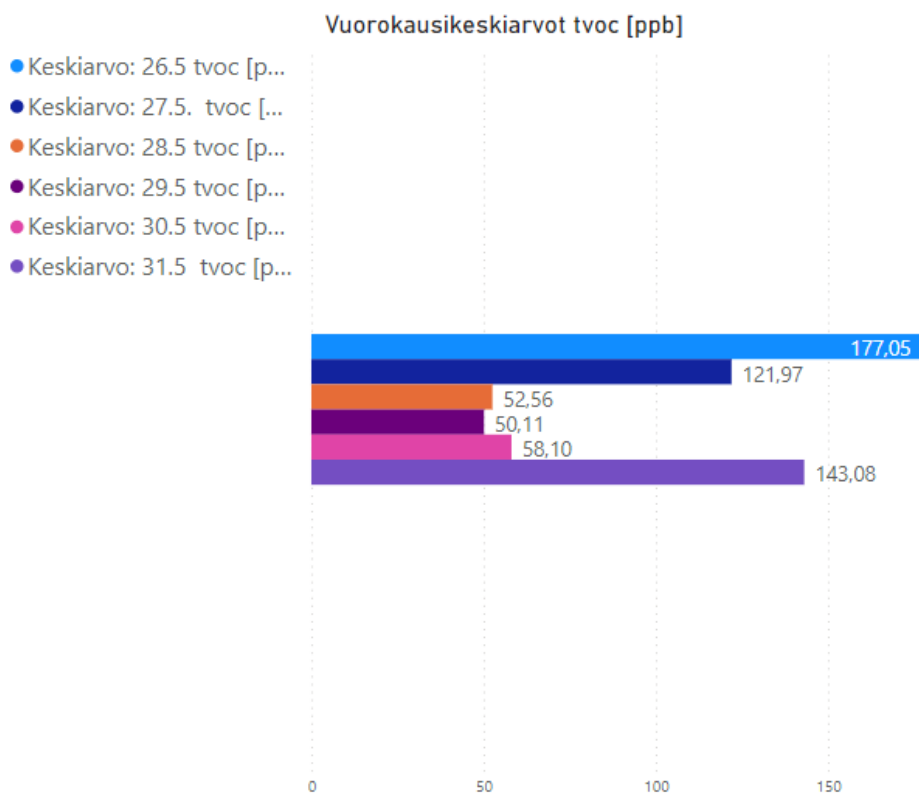
Kuva 79. PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Milesight- AM319

Saman mittausjakson vuorokausikohtaiset PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] pitoisuudet pysyivät raja-arvojen alapuolella PM10-pitoisuus 24 tunnin mittauksen aikana sisäilmassa enintään 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (Kuva 80).



Kuva 80. PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Milesight-AM319

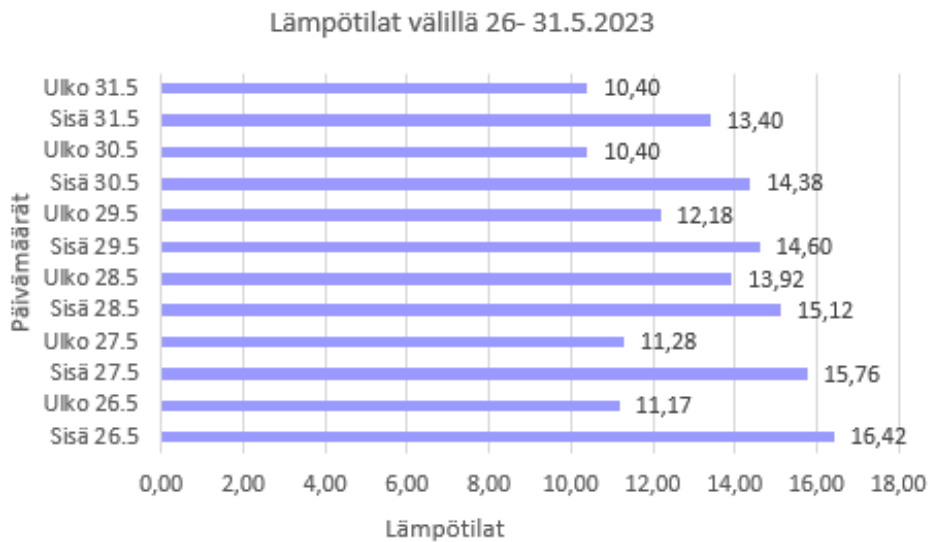
Sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus TVOC-arvot mittausjaksolla 26.5- 31.5.2021 (Kuva 81).



Kuva 81. TVOC-arvot mittausjaksolla Milesight-AM319

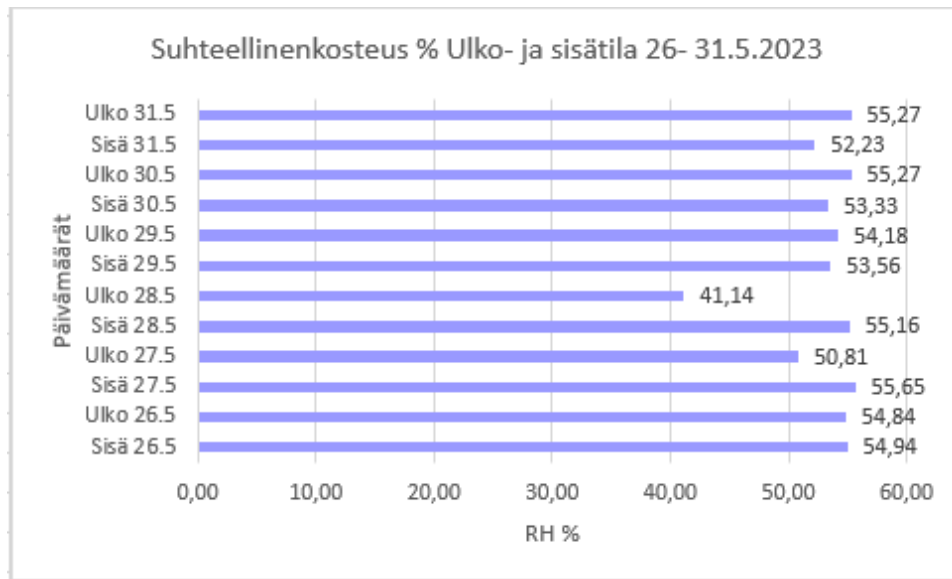
12.1.2 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet ajalla 26.5- 31.5.2023

Mittausjaksolla sisä- ja ulkoilman lämpötila pysyi alle 20 °C (Kuva 82). Suhteellinen kosteus (RH- %) pysyi sisätiloissa hyvin tasalaatuisena (Kuva 83). Absoluuttinen kosteus oli sisätilassa suurempi kuin ulkoilmassa. Rakenteessa kosteus liikkuu kohti pienempää pitoisuutta, rakenteen kuivuminen oli alkanut ja rakenne pääsee kuivumaan ulospäin (Kuva 84).

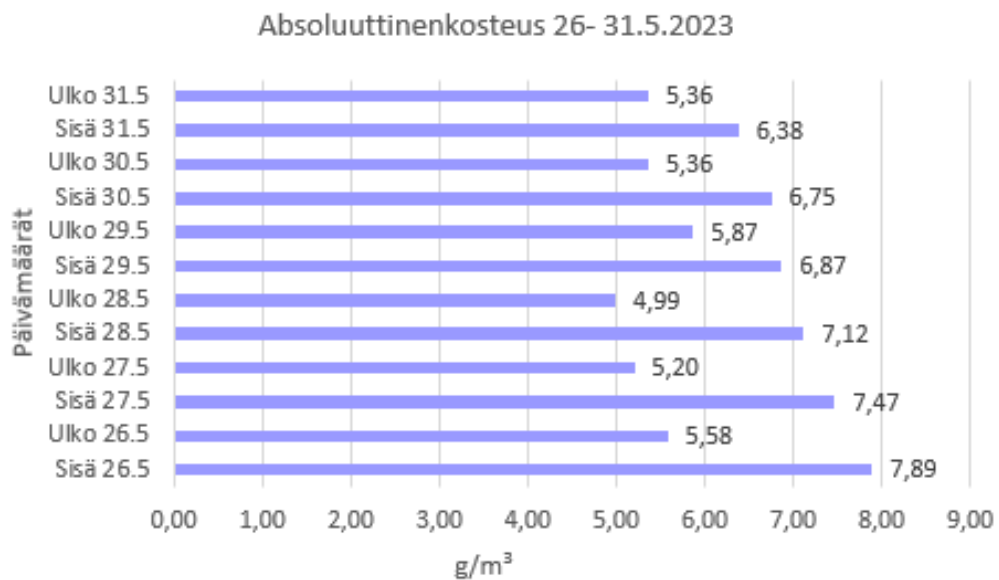


Kuva 82. Ulko- ja sisäilman lämpötilat mittausjaksolla

Sisä- ja ulkoilman RH-% välillä 26-31.5.2023.



Kuva 83. Suhteellinen kosteus (RH- %) mittausjaksolla



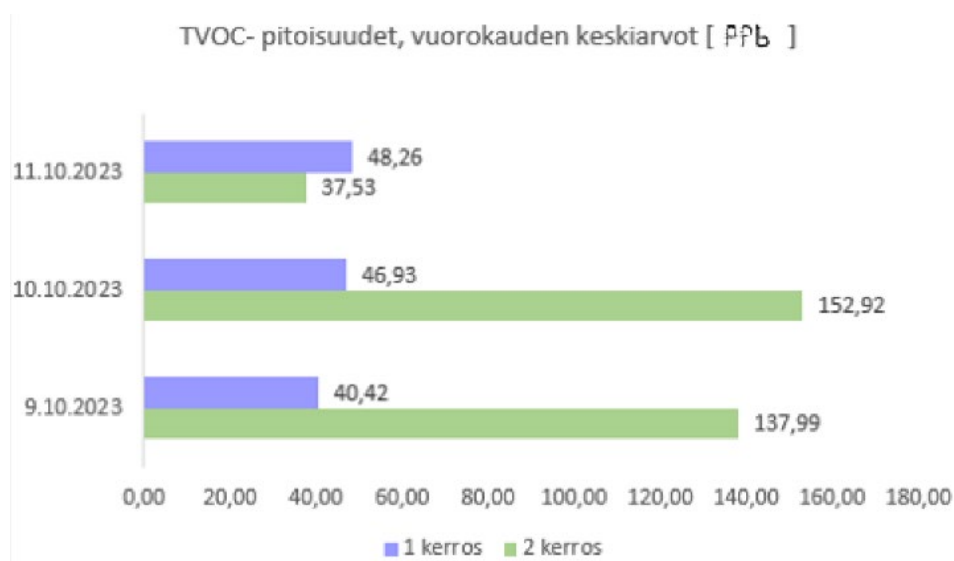
Kuva 84. Absoluuttinen kosteus [g/m³] mittausjaksolla

12.2 TVOC-pitoisuudet

Laboratorioanalyysienkin perusteella TVOC-arvot ylittivät toimenpiderajan. Ilmanvaihdon käynnistyttyä 10.10.2023 pitoisuudet lähtivät selvästi laskemaan. IOTSU® AQ09 kerätty data osoittaa 11.10.2023 pitoisuuksien laskeneen (Kuva 85). Myös aistienvaraisesti huomasi sisäilmanlaadun parantuneen.

Taulukko 14. TVOC-pitoisuudet 1 ja 2 kerros 9.10-11.10.2023 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Yläkerta	Toimenpideraja	Laboratorioanalyysi Ilmanvaihto. ei päällä			Laboratorioanalyysi Ilmanvaihto. päällä		
TVOC	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.3569	10 °C	RH % 65	1.365	17 °C	RH % 49
		2.1781	12 °C	RH % 57	2.239	19 °C	RH % 49
		3.2696	16 °C	RH % 56	3.271	19 °C	RH % 51
Alakerta	Toimenpideraja	Laboratorioanalyysi Ilmanvaihto. ei päällä			Laboratorioanalyysi Ilmanvaihto. päällä		
TVOC	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.758	8 °C	RH % 58	1.226	17 °C	RH % 46
		2.677	12 °C	RH % 61	2.176	18 °C	RH % 52
		3.1238	16 °C	RH % 58	3.141	19 °C	RH % 54



Kuva 85. Vuorokauden keskiarvot 1 ja 2 kerros [ppb] IOTSU® AQ09

Erilaisia yhdisteitä laboratorioanalyseissä löytyi paljon, esimerkiksi yhden näyteputken yhteenlaskettu määrä oli 78 eri yhdistettä. Taulukoissa on lueteltu näistä muutamia yhdisteitä (Taulukot 15 ja 16).

Taulukko 15. Esimerkkejä yksittäisistä löytyneistä yhdisteistä (VOC-yhdisteet) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Alakerta. (mukaillen Simo Erkko)

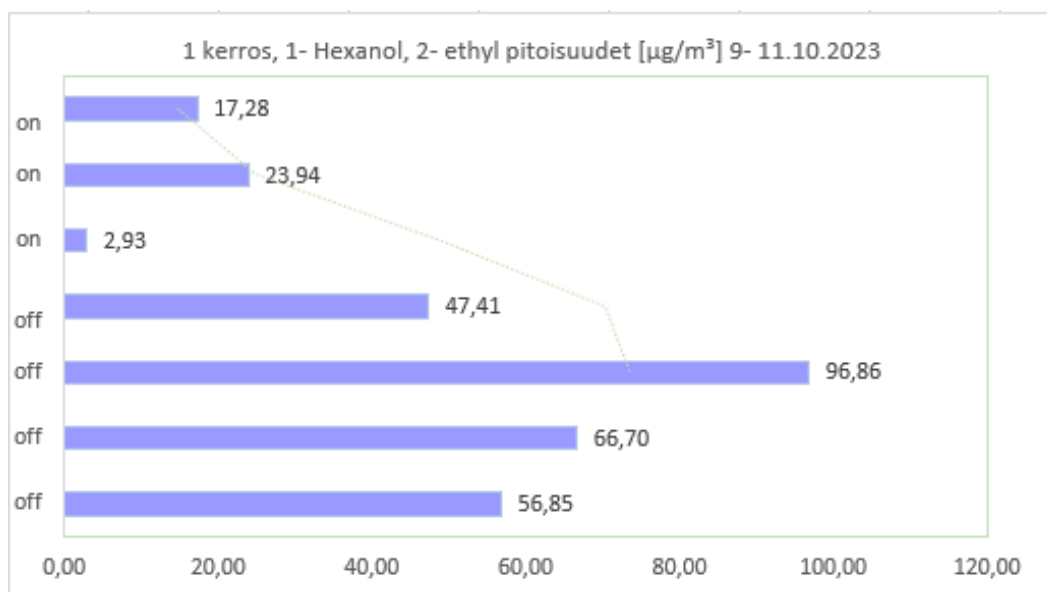
Yhdiste/ alakerta	Raja-arvo	Ilmanvaihto ei päällä			Ilmanvaihto päällä		
β -pinene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	29	22	46	5	4	4
α -Pinene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	307	220	477	54	47	37
3-carene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	64	54	91	10	8	8
D-limonene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	42	39	64	6	3	3
Hexanal	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	38	33	60	6	5	6
2-ethyl-1-hexanol	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	57	67	97	24	17	18

Taulukko 16. Esimerkkejä yksittäisistä löytyneistä yhdisteistä (VOC-yhdisteet) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Yläkerta (mukaillen Simo Erkko)

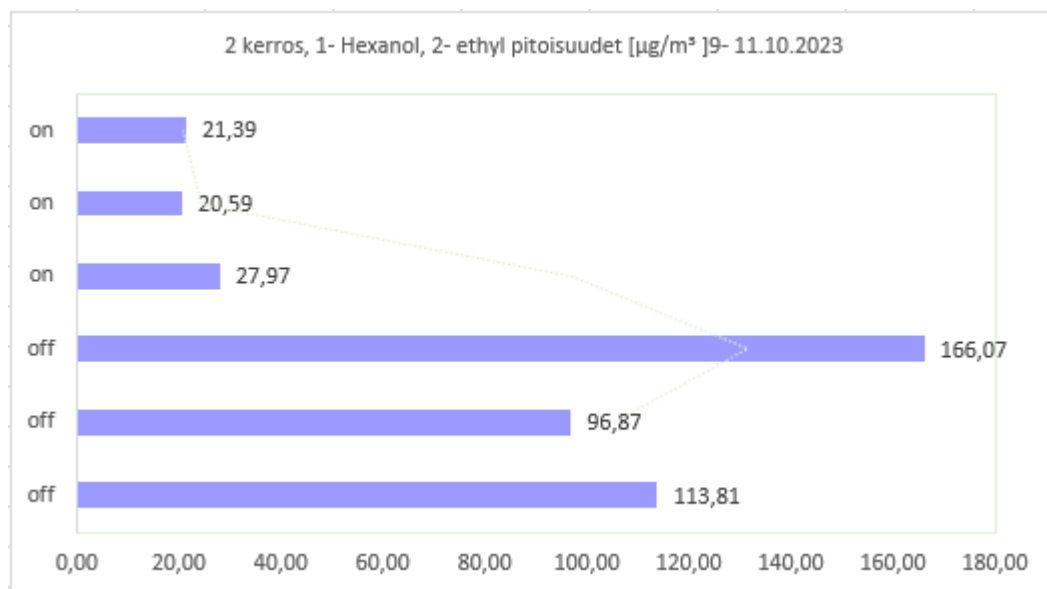
Yhdiste/ yläkerta	Raja-arvo	Ilmanvaihto ei päällä			Ilmanvaihto päällä		
β -pinene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	143	59	86	9	5	6
α -Pinene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	1999	858	1067	169	83	104
3-carene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	481	262	399	44	29	32
D-limonene	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	124	74	140	9	5	6
Hexanal	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,	120	61	122	10	7	9
2-ethyl-1-hexanol	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	114	97	166	28	21	21

Alla olevista kuvaajista voidaan havaita yhden yksittäisen pitoisuuden laskevan ilmanvaihdon käynnistämisen jälkeen. 1- hexanol- 2- ethyl toimenpide-rajaksi huoneilmassa on määritelty $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mutta kuitenkin pitoisuudet ylittivät vielä IV-koneiden käynnistyksen jälkeenkin (Kuvat 86 ja 87).

- Ilmanvaihto päällä, taulukossa → on
- Ilmanvaihto on pois päältä, taulukossa → off



Kuva 86. 1krs. Yhden yksittäisen VOC-pitoisuuden arvo. 30min. näyte, laboratorionäyte.



Kuva 87. 2krs. Yhden yksittäisen VOC-pitoisuuden arvo. 30min. näyte, laboratorio-analyysi.

Testitalon kaupalliset anturit mittaavat TVOC-pitoisuudet yksikössä ppb (Parts per billion). Laboratorioanalyysit on ilmoitettu yksikössä $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Yksittäisen haihtuvan orgaanisen yhdisteen pitoisuuden muuntaminen yksiköstä ppb yksikköön $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voidaan laskea kaavalla:

$$\mu\text{g} / \text{m}^3 = \frac{\text{g} / \text{mol} \cdot \text{ppb}}{24,45}$$

missä:

g/mol= yhdisteen molekyylipaino

ppb= yhdisteen pitoisuus yksikössä [ppb]

24,4= kaasun moolitilavuus

Esimerkkinä formaldehydipitoisuus 1 ppb. Formaldehydin molekyylipaino 30,03 g/mol.

Tulos:

$$(1[\text{ppb}] * 30,03 [\text{g/mol}]) / 24,4 = 1,23 \text{ mg} / \text{m}^3 = 1\,230 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutta ppb (TVOC) ei voida suoraan muuttaa yksikköön $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Käyttämällä sisäilmassa yleisesti esiintyvien yhdisteiden keskimääräistä molekyylipainoa, voidaan laskea suuntaa antava tulos.

Milesight AM319-anturin TVOC-pitoisuuksien enimmäispitoisuudet kesä- syyskuu mittausjaksolla pysyttelivät enimmillään 250 ppb (Kuva 89). Lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti paljonko arviolta 250 ppb olisi $\mu\text{g}/\text{m}^3$:

Tulos:

$$110 [\text{g/mol}] / (0,0244 [\text{m}^3/\text{mol}] * 1\,000\text{ppb}) * 250 [\text{ppb}] = 1\,127 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

missä:

V_m = Ideaalikaasun tilavuus Euroopassa (Normal Temperature and Pressure, 0 °C, 101,3 kPa) 22,4 l/mol tai,

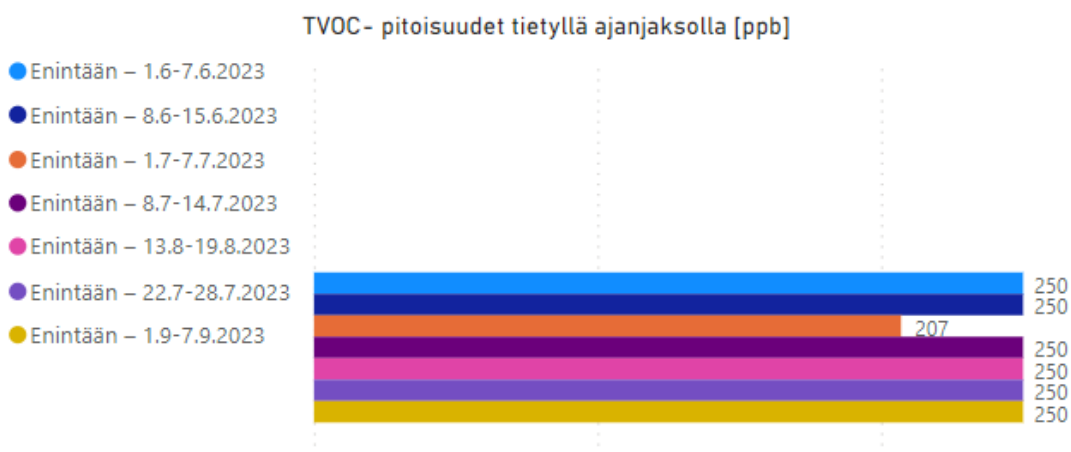
V_m = Ideaalikaasun tilavuus USA (Normal Temperature and Pressure, 20 °C, 101,3 kPa) 24,05 l/mol

$M_{\text{gas.mix}}$ = keskimääräinen yhdisteiden moolipaino (110 g/mol yleisesti sisäilmassa esiintyvien 22 yhdisteen keskiarvo)

$C_{\text{gas.mix}}$ = haihtuvien orgaanisten yhdisteiden yhteispitoisuus yksikössä ppb

		$M_{\text{gas mix}} \text{ [g/mol]}$	\times	$C_{\text{gas mix}} \text{ [ppb]}$			
$\rho_{\text{gas mix}} \text{ [}\mu\text{g/m}^3\text{]} =$		$(V_m \times 1000 \text{ ppb})$					
$V_m =$	moolitilavuus	0,0244 m ³ /mol (25 °C, normaalissa ilmanpaineessa)					
$C_{\text{gas mix}} =$	ppb pitoisuus						
$M_{\text{gas mix}} =$	110 [g/mol] keskimääräinen moolipaino 22 sisäilmassa esiintyvältä yhdisteeltä						
Esimerkki 1ppb=4,5 $\mu\text{g/m}^3$							

Kuva 88. Kaava TVOC [ppb] to $\mu\text{g/m}^3$. (mukaillen www.catsensors.com/Sensor_Sensorion_IAM.pdf)

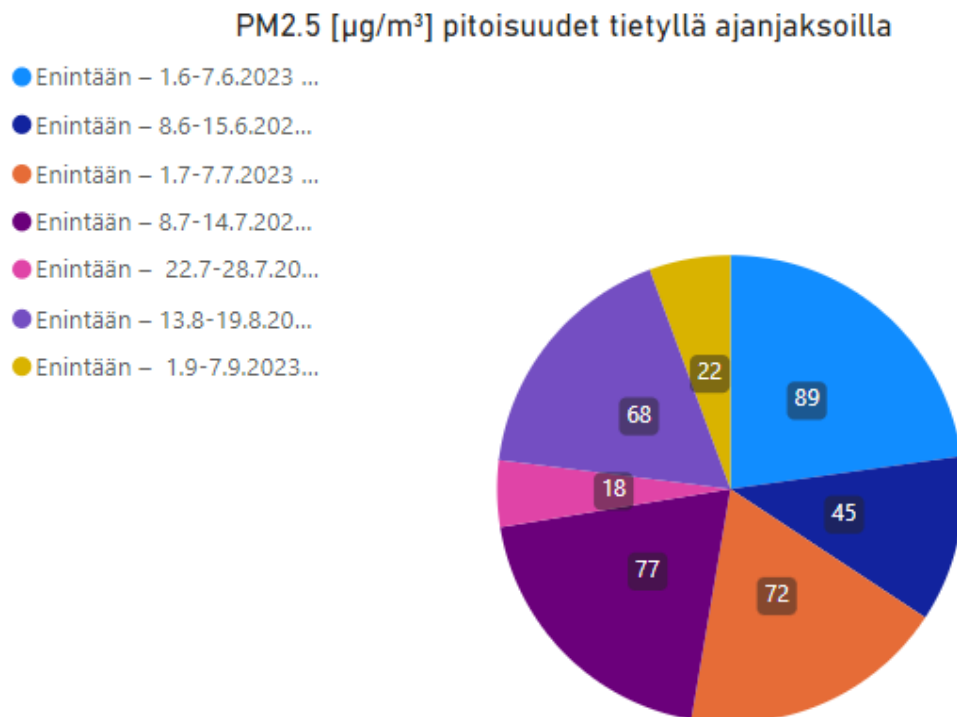


Kuva 89. Milesight AM319, TVOC-pitoisuudet suurimmat arvot

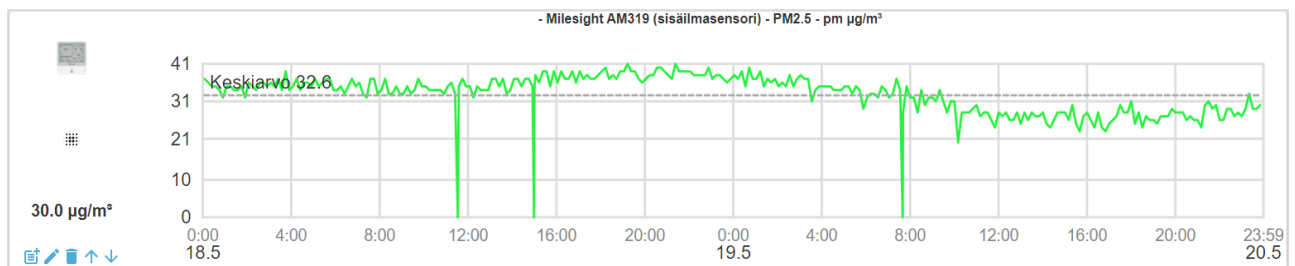
TVOC-pitoisuuksien enimmäisarvoja viikoittaisilla mittausjaksoilla yksikkönä [ppb] (Kuva 89).

12.2.1 Hiukkaspitoisuudet

Pienhiukkasten osalta mittausjaksolla kesä- syyskuu, voidaan todeta pitoisuuksien käyneen suositusarvoja korkeammalla. Raja-arvo pitoisuuksille on: PM2,5 pitoisuus 24 tunnin mittauksen aikana sisäilmassa enintään 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kuva 90). Hiukkaspitoisuudet olivat suurimmillaan ensimmäisten kuukausien aikana testitalon pystytyksen jälkeen. Pitoisuudet olivat jo lähteneet laskemaan ennen laboratorionäytteitä, joten näiden tulokset eivät enää ylittäneet raja-arvoja merkittävässä määrin.



Kuva 90. Milesight AM319. PM2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, suurimmat pitoisuudet mittausjaksoilla.



12.2.2 Olosuhteiden vaikutukset sisäilmanlaatuun

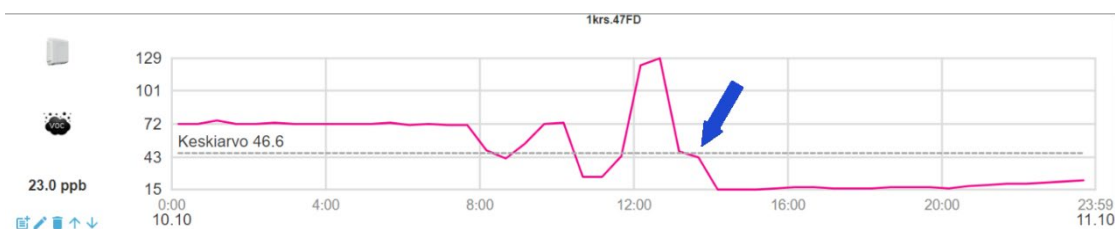
Testitalossa saatiin lokakuulla tehtyä loppusiivous ja ilmanvaihtokoneiden käynnistys. Ajankohdat ovat lueteltuina kuvassa 92.

pvm. / klo:	Työnkuvaus
10.10.2023 9:15-10:15	Siivous testitalon imurointi roskien keräys
10.10.2023 Olosuhteet Klo. 10- 12:00 Ts 18 °C RHs % 55,8 % Klo.14- 15:00 Tu 3,9 °C RHu % 80 %	testitalon tiiveysmittaukset 1 kerros 2 kerros
10.10.2023 IV- koneiden käynnistys	Tehdas säädöillä tulo/ poisto 50 % / 50 %
13.10.2023 IV- koneiden manuaalinen säätö	tulo/ poisto 20 %/ 20 %
20.10.2023 Sähköt pois päältä klo. 9:40 Sähköt päälle klo. 11:40	
25.10.2023 Sähköt pois päältä klo. 11:13 Sähköt päälle klo. 12:59	

Kuva 92. Työnkuvaus ja ajankohdat välillä 10.10- 25.10.2023

Testitalossa tehtiin siivous ennen tiiveysmittauksia ja ilmanvaihtokoneen käynnistämistä. Laadukas rakennusimuri vaikutti osaltaan siihen, ettei pienhiukkasnäytteissä näkynyt merkittävää nousua pitoisuuksissa siivouksen aikana. Siivouksen aikana ovia aukaistiin useasti.

Alla oleva kuvaaja osoittaa ilmanvaihdon käynnistymisen jälkeen TVOC-pitoisuuden lähtevän laskemaan (Kuva 93).



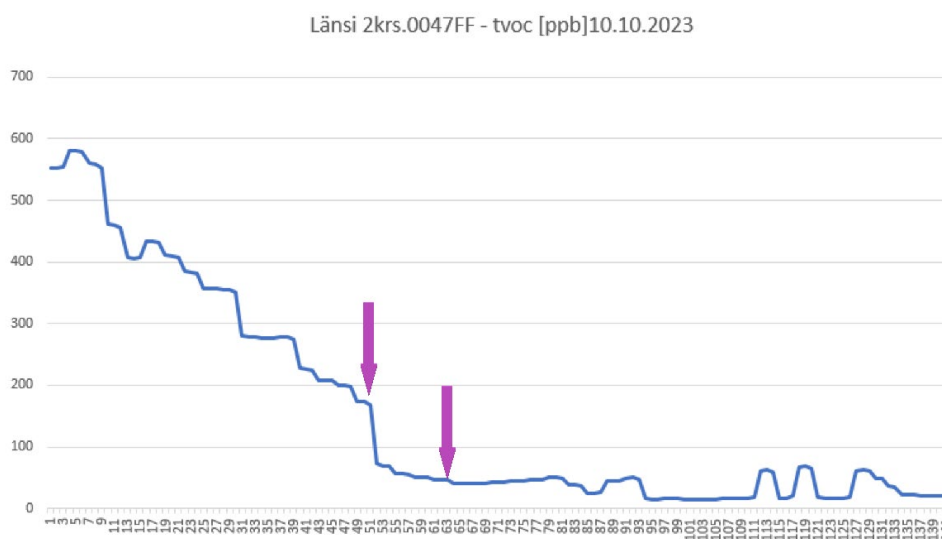
Kuva 93. 1 kerros. IV-koneen käynnistys klo 13:42

Ensimmäisen kerroksen TVOC-pitoisuuksien vaihtelut toimenpiteiden aikana voidaan nähdä alla olevasta kuvaajasta. Pisteiden 50 kohdalla tapahtuu selvää laskua pitoisuudessa, kello oli tuolloin 8:11 ja testitalossa ovia pidettiin auki hetkittäin. TVOC-pitoisuus tuolla ajanhetkellä oli 48,79 ppb. Seuraava pitoisuudenlasku oli pisteessä 65 kello 11:10 pitoisuuden ollessa 26 ppb. Pisteiden 72 kohdalla pitoisuus on lähtenyt nousemaan kellon ollessa 11:42, ja pitoisuus oli 51,9 ppb. Kuvaajasta nähdään pitoisuudessa nousua pisteiden 76 kohdalla kellon ollessa 12:40, ja pitoisuus 129 ppb, jolloin ensimmäisen kerroksen tiiveysmittaus oli saatu jo suoritettua. Kuitenkin pisteessä 81 pitoisuus oli lähtenyt laskemaan, joka oli 47,5 ppb kellon ollessa tuolloin 13:13. Illalla ilmanvaihdon ollessa päällä muutamia tunteja klo 23:13 pisteessä 122 pitoisuus oli 22,09 ppb (Kuva 94).



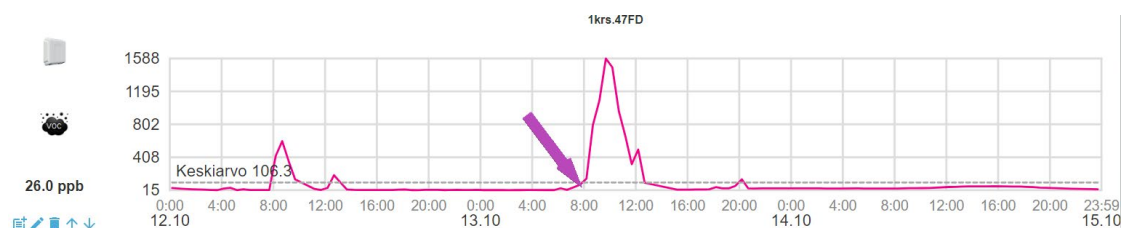
Kuva 94. 1krs. TVOC-pitoisuus 10.10.2023

Alla olevasta kuvaajasta voidaan havaita toimenpiteiden vaikutuksia TVOC-pitoisuuksiin tietyillä ajanhetkillä kerroksessa kaksi. Pisteen 51 kohdalla kello oli 8:10 ja pitoisuus 166,73 ppb. Pisteen 63 kohdalla kello oli 10:13 ja pitoisuus 46,5 ppb. Tästä voidaan nähdä ovien aukiolon ja siivouksen vaikutukset pitoisuuksiin, jotka lähtivät laskemaan. Illalla kun ilmanvaihto oli ollut jo jonkin aikaa käynnissä kuvaajassa pisteen 135 kohdalla pitoisuus on laskenut ja oli enää 23 ppb. (Kuva 95).

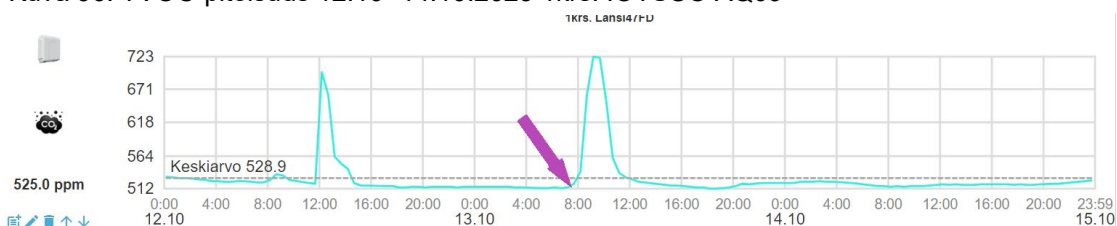


Kuva 95. 2krs. TVOC-pitoisuus 10.10.2023

Ilmanvaihtokoneiden manuaalinen säätö tehtiin 13.10.2023. Säädöt aloitettiin aamulla klo 8:00. Säädön ajankohta voidaan nähdä myös alla olevista kuvaajista piikkinä kuvaajassa, jonka jälkeen pitoisuudet tasoittuivat kuitenkin nopeasti. Kuvaajissa ensimmäisenä TVOC-pitoisuus ja toisena sisäilman hiilidioksidipitoisuus. Mittausjakso 12.10- 14.10.2023 (Kuvat 96 ja 97).



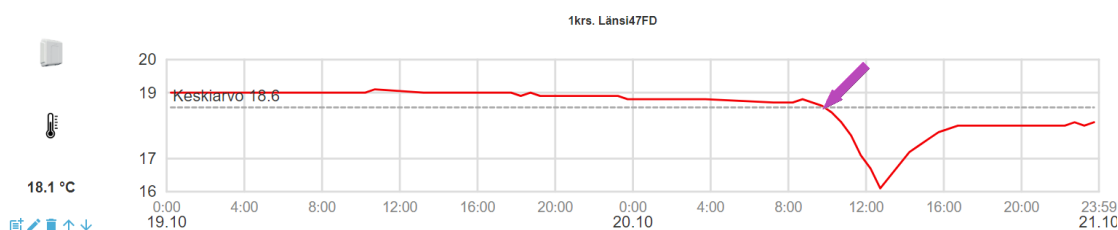
Kuva 96. TVOC-pitoisuus 12.10- 14.10.2023 1krs. IOTSU® AQ09



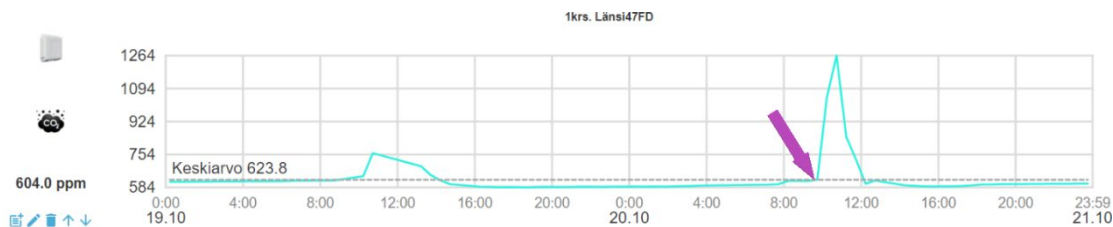
Kuva 97. Co2-pitoisuus 12.10- 14.10.2023 1krs. IOTSU® AQ09

12.2.3 Sähkökatkosten hetkelliset vaikutukset

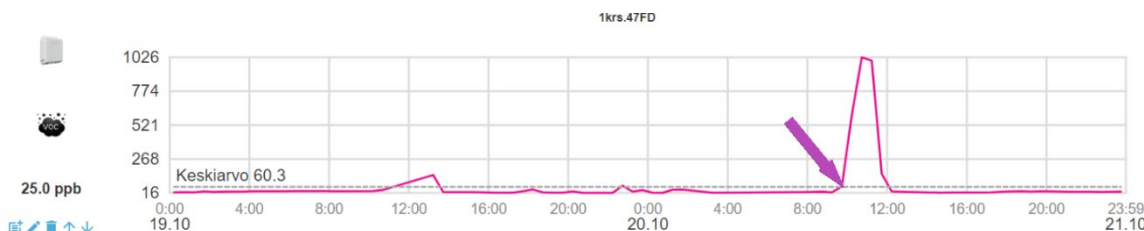
Ensimmäinen sähkökatkos oli testitalossa 20.10.2023 klo 9:40- 11:40, jolloin sähköasentaja kävi talossa viimeistelemässä sähkötyöt. Kuvaajista alla voi nähdä ajankohdan, jolloin sähköt olivat poispäältä. Lämpötilakuvaaja näyttää ajankohdassa lämpötilan laskua. Ovia aukaistiin työn ohessa sekä sähköparit olivat poispäältä, jonka vuoksi lämpötila pääsi hetkellisesti tippumaan. TVOC- ja Co₂-pitoisuudet nousivat tuolla ajankohdalla. Näiden tulosten perusteella pitoisuuksiin vaikuttaa IV-koneiden sammuminen sekä asentajan läsnäolo (Kuvat 98–100).



Kuva 8. Ensimmäisen kerroksen lämpötila 20.10.2023. IOTSU® AQ09

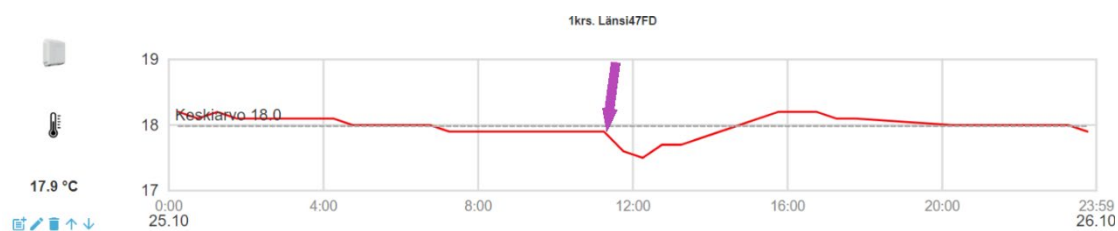


Kuva 9. Ensimmäinen kerros Co₂-pitoisuus 20.10.2023 IOTSU® AQ09

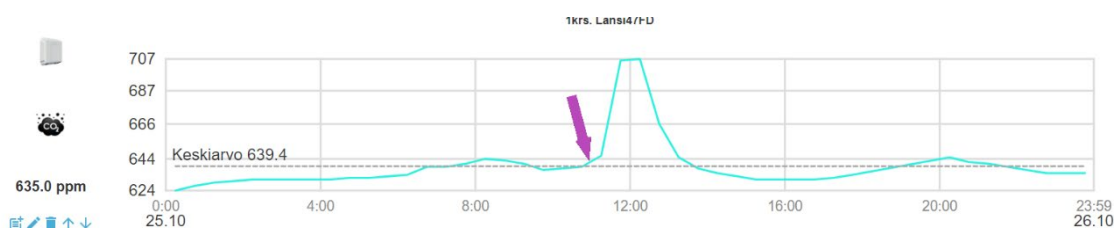


Kuva 100. Ensimmäinen kerros TVOC-pitoisuus 20.10.2023 IOTSU® AQ09

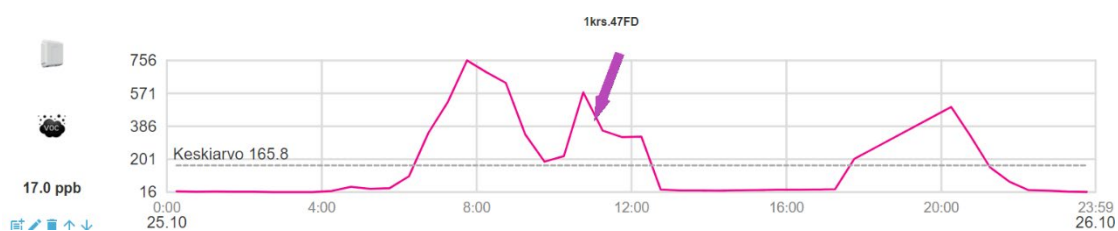
Toinen sähkökatkos oli testitalossa 25.10.2023, klo 11:13- 12:59. Kuvaajista näkyy sähkökatkoksen ajanhetki. Lämpötila tippui hetkellisesti ja Co2-pitoisuus lähti nousuun. TVOC-pitoisuudessa puolestaan näkyy nousua ennen katkosta, klo 12:15 katkoksen aikana pitoisuus lähtee laskemaan. Välillä 12:45- 17:15 pitoisuus pysyy tasaisena (Kuvat 101–103).



Kuva101. Ensimmäinen kerros lämpötila 25.10.2023 IOTSU® AQ09



Kuva 102. Ensimmäinen kerros Co2-pitoisuus 25.10.2023 IOTSU® AQ09



Kuva 103. Ensimmäisen kerroksen TVOC-pitoisuus 25.10.2023 IOTSU® AQ09

TVOC-pitoisuuden nousun ennen sähkökatkosta voisi selittää, se että luultavimmin talossa on käynyt asentaja ennen katkoa (Kuva 103).

13 YHTEENVETO

Yhteenvetona voidaan näiden mittaustulosten perusteella todeta, että testitalon sisäilman kemikaalipitoisuudet ylittivät toimenpidesuosituksen ja asetetut raja-arvot. Kesän ja alkusyksyn aikana kerättiin dataa käyttäen kaupallisia mittalaitteita. Olisi ollut suotavaa, että rakennuksen pystytyksen jälkeen testitalossa olisi tehty myös sisäilma-analyyskejä säännöllisin väliajoin näiden laitteiden ohella. Tämä olisi mahdollistanut yksittäisten haihtuvien orgaanisten aineiden pitoisuuksien selvittämisen kesän aikana ja antanut syvällisemmän käsityksen niiden nousua aiheuttavista olosuhteista ja tekijöistä.

Valitettavasti ajan rajallisuuden vuoksi tässä opinnäytetyössä ei voitu yksilöidä tarkkaa syytä kemikaalikuorman syntymiselle testitalon sisäilmassa. Kuitenkin havaittiin, että lokakuussa 2023, yli puolivuotta rakennuksen pystytyksen jälkeen, sisäilman kemikaalipitoisuudet olivat edelleen merkittävän korkeita. Tämä korostaa tehokkaan ilmanvaihdon tärkeyttä uudisrakennuksissa, myös terveellisten ja turvallisten työolosuhteiden varmistamiseksi.

Lisäksi olisi ollut kiinnostavaa saada laboratorioanalyysien tuloksia sähkökatkosten vaikutuksista kaupallisten sensoreiden datan rinnalla sekä tutkia pitempien katkosaikojen vaikutuksia sisäilman laatuun. Saatujen tulosten perusteella haitta-aineiden pitoisuuksissa ei testitalossa olleilla sähkökatkoksilla ollut mittaushetkellä kovin kriittisiä vaikutuksia.

Testitalossa päivittäin työskentelevä olisi voinut altistua kemikaaleille, ennen ilmanvaihdon käynnistämistä.

14 POHDINTA

Ilmanvaihto käynnistetään ja säädetään yleensä vasta viimeisessä rakennusvaiheessa, kuitenkin myös mittaustulosten perusteella sisävaiheenvalmistustöiden aikana olisi tärkeää olla toimiva ilmanvaihto. Jos rakennusaikana käytetään kohteessa olevaa ilmanvaihtoa, joudutaan ennen rakennuksen varsinasta käyttöönottoa puhdistamaan IV-tekniikka, ilmanvaihtokanavisto sekä vaihtamaan suodattimet. Tämä lisää työvaiheita, eikä ole kustannustehokasta. Rakennusalan ammattilaisten työterveyden edistämisen kannalta olisi tärkeää viedä asiaa eteenpäin ja kehittää kustannustehokkaita, tehokkaita ratkaisuja ilmanvaihtoon rakennustyömailla. Voisiko rakennustyömailla sisävaiheen valmistustöissä ottaa käyttöön esimerkiksi aktiivihiihitsuodattimella varustellun ilmanpuhdistimen kemikaalipäästöjen vähentämiseksi ja työturvallisuuden varmistamiseksi.

Kaupallisten sensoreiden avulla voitaisiin myös saada seurattua työolosuhteita ja mahdollisesti ennaltaehkäistä altistumisia kemikaaleille. Myös lämpötila- ja kosteusolosuhteiden seuranta onnistuu hyvin kaupallisten mittalaitteiden avulla. Olosuhteiden seuranta ja kerätyn datan tallennus pilvipalveluun helpottaa rakennusaikaisten olosuhteiden seurantaa. Tämä auttaa myös reagoimaan mahdollisiin kriittisiin olosuhteisiin hyvissä ajoin.

Laboratorioanalyysien perusteella haitta-aineiden pitoisuudet olivat suurempia kuin kaupallisten sensoreiden keräämässä datassa. Tässä monia huomioon otettavia seikkoja ja suoraan näitä ei voi keskenään verrata. Yksittäinen laboratorio näytteenottoaika oli 30–45 min. Kaupallisilla sensoreilla on eri tiheyksiä mittaussajoissa.

Tämän opinnäytetyön tekeminen oli erittäin opettavainen prosessi, joka auttoi syventämään ymmärrystäni rakentamisen työturvallisuuden merkityksestä ja sen kehittämisen tärkeydestä. Tutkimuksen aikana huomasin, kuinka käsitykseni rakennusalan sisävalmistusvaiheen turvallisuudesta muuttui merkittävästi. Mitä perusteellisemmin pääsin perehtymään aiheeseen, sitä selvemmin huomasin, kuinka keskeistä on huolehtia työntekijöiden turvallisuudesta jokaisessa rakennusprojektin vaiheessa.

Teknologian ja uusien innovaatioiden myötä, myös näitä edistysaskelia voidaan ottaa mukaan työolosuhteiden ja työturvallisuuden seurantaan kaikenkoisissa rakennusprojekteissa. Uusien menetelmien omaksuminen ja teknologioiden hyödyntäminen alan toimijoiden keskuudessa olisi tärkeää työntekijöiden hyvinvoinnin ja työturvallisuuden parantamisessa. Tämä opinnäytetyö on osoittanut, kuinka tärkeää on jatkaa tutkimusta ja kehitystä tästä aiheesta, jotta voidaan varmistaa turvallisemmat ja tehokkaammat työympäristöt rakennusalalla.

14.1 Kiitokset

Lopuksi haluaisin osoittaa suuret kiitokseni Juha-Pekka Luukkaiselle. Hänen arvokkaat neuvonsa ja ideoidensa jalostaminen ovat olleet korvaamattomia opinnäytetyöni kehittymisessä. Sydämelliset kiitokset kuuluvat myös koko työtiimilleni heidän kannustuksestaan ja tuestaan koko projektin ajan. Isot kiitokset Marko Saikkoselle opastuksesta sensorimaailmassa.

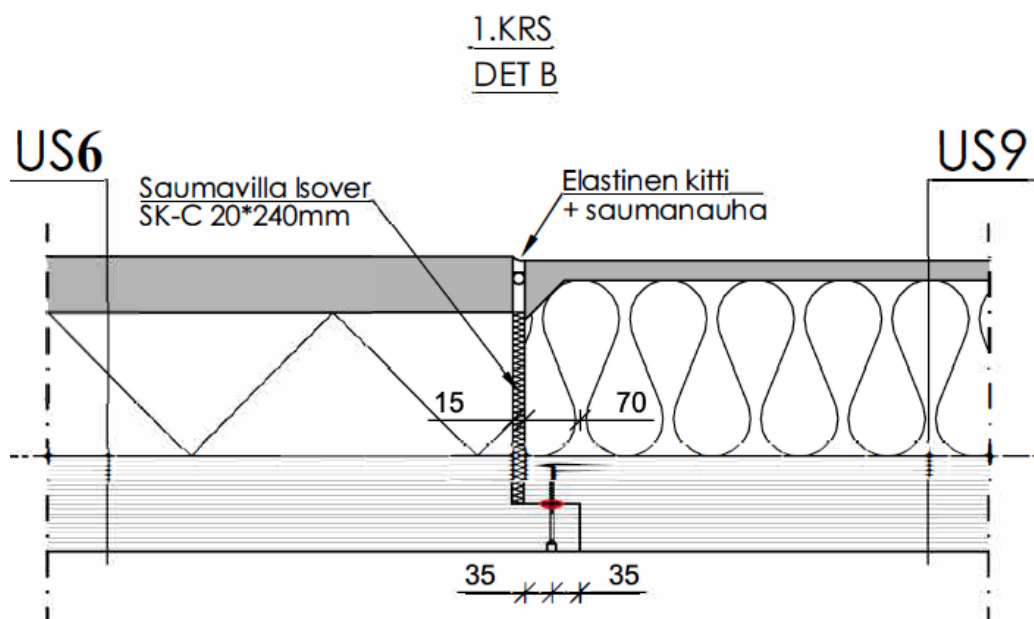
Erityiskiitokset Simo Erkolle ja Marko Hyttiselle, joiden asiantuntemus on auttanut minua syventymään sisäilman maailmaan. Kiitän myös Petteri Härköstä, joka on ohjannut opinnäytetyötäni ammattitaitoisesti.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni, jotka ovat olleet tukenani ja kannustaneet minua vaikeina hetkinä. Teidän tuestanne olen syvästi kiitollinen.

LÄHTEET

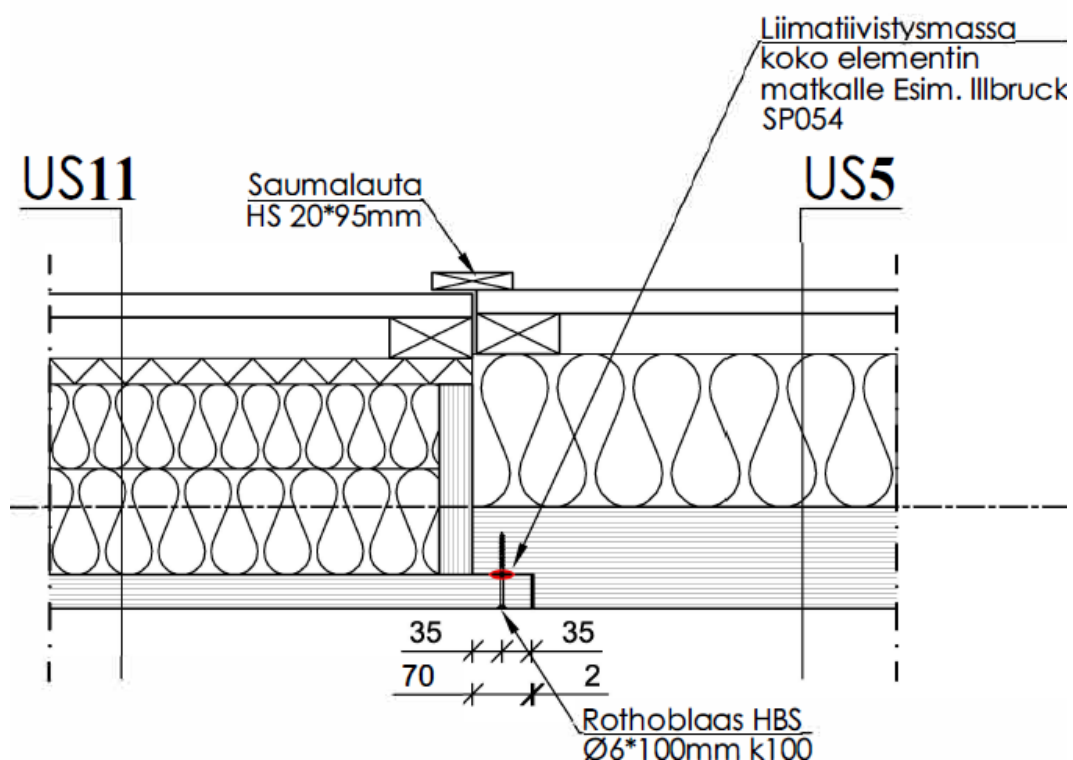
1. LVI- 05- 10417. Rakennustieto. Rakennusten sisäilmaston suunnittelu- perusteet. 2007
2. Sisäilmastoluokitus 2000. Sisäilmayhdistys ry. s. 8. Espoo: Kirjapaino verbi. 2001
3. RT 07-11299. Rakennustieto. Sisäilmastoluokitus 2018. 2018
4. OVA- ohjeet: käyttäjän opas. Työterveyslaitos. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.ova.ttl.fi/ova-ohjeet-kayttajan-opas> [viitattu 11.9.2023]
5. Altistuminen työympäristön haittatekijöille. Työterveyslaitos. WWW- do- kumentti. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvaluokitus/altistumi- nen-tyoympariston-haittatekijöille> [viitattu 13.9.2023]
6. Siikanen, U. Rakennustieto Oy. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovel- luksia. Helsinki: Rakennustieto Oy. 2017, s. 7–80.
7. Di- isosyanaattien käytölle koulutusvaatimus. Turvallisuus- ja kemikaali- virasto (Tukes). WWW- dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://tukes.fi/- /di-isosyanaattien-kaytolle-koulutusvaatimus> [viitattu 13.9.2023]
8. Kemikaalit- ja työ. julkkari.fi. PDF- dokumentti. 2005. Saatavissa: <https://www.julkkari.fi/bitstream/handle/10024/131976/kemikaalit-ja- tyo.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 13.9.2023]
9. Kemiaalliset epäpuhtaudet. Sisäilmayhdistys ry. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisail- masto/Kemiaalliset-epapuhtaudet> [viitattu 10.9.2023]
10. Työturvallisuus. Työterveyslaitos. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvaluokitus/altistuminen-tyoympariston-hait- tatekijöille/kemiaallisten-tekijöiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo- altistumistietosivusto/formaldehydi> [viitattu 10.9.2023]
11. Asuntojen radonia koskevat viitearvot ja määräykset. Säteilyturvakes- kus. (STUK). WWW-dokumentti. <https://stuk.fi/asuntojen-radonia-koske- vat-viitearvot-ja-maaraykset> [viitattu 26.9.2023]
12. LVI- 05- 10417. Rakennustieto. Rakennusten sisäilmaston suunnittelu- perusteet. 2007.
13. Milesight AM319 HCHO olosuhdemittari. WWW- dokumentti. Saata- vissa: <https://www.fsm.fi/Milesight-AM319-HCHO/ekauppa/p51372/> [vii- tattu 13.9.2023]
14. Milesight EM300-TH lämpötila-/kosteussensori. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.fsm.fi/Milesight-EM300-TH-lampo- tila/ekauppa/p51380> [viitattu 13.9.2023]

15. IOT- anturigatalogi. DIGITA Oy. PDF- dokumentti. 2023. Saatavissa: <https://www.digita.fi/app/uploads/2023/06/Anturikatalogi-2023-ei-hinnastoa.pdf> [viitattu 13.9.2023]
16. IOTSU® AQ09. Smalldatagarden. PDF- dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://smalldatagarden.com/wp-content/uploads/2022/09/IOTSU-AQ09-Combo-Flyer.pdf> [viitattu 13.9.2023]
17. IOTSU® DP for LoRaWAN®. Smalldatagarden. PDF- dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://smalldatagarden.com/wp-content/uploads/2021/03/IOTSU%C2%AE-L3-DP01.pdf> [viitattu 13.9.2023]
18. Wiiste Oy. Tuotteet. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.wiiste.com/> [viitattu 13.9.2023]
19. Teriö, O., Hämäläinen, J. Kestävä rakentaminen. Opetushallitus. 73.–75. painos. Helsinki: Next Print Oy. 2017.
20. Ympäristöministeriön asetus. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki. 10/2003, s. 21
21. Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa D3. s. 10. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.finlex.fi/37188-D3-2012_Suomi [viitattu 14.10.2023]
22. Onnline. Poistoilmaventtiili onnline KSO-125-ON. PDF- dokumentti. Saatavissa: [ONNLINE POISTOILMAVENTTIILI ONNLINE KSO-125-ON | Tulo- ja poistoilmaventtiilit | Onninen](https://www.onnline.fi/ONNLINE_POISTOILMAVENTTIILI_ONNLINE_KSO-125-ON|Tulo-ja-poistoilmaventtiilit|Onninen) [viitattu 24.10.2023]
23. Asumisterveysasetus. Helsinki. 4/2015. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545#Pidm46494958993120> [viitattu 1.11.2023]
24. LVI 31- 10507. Rakennustieto. Hiukkassuodatuksen peruskäsitteet. 5/2012.
25. Tulo- ja poistoilmaventtiilit. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/> [viitattu 13.11.2023]
26. Ympäristöministeriö. Rakennusten kosteustekninen toimivuus. PDF-dokumentti. S.31. Saatavissa: <http://www.ym.fi/rakentamismaaraykset> [viitattu 12.11.2023]



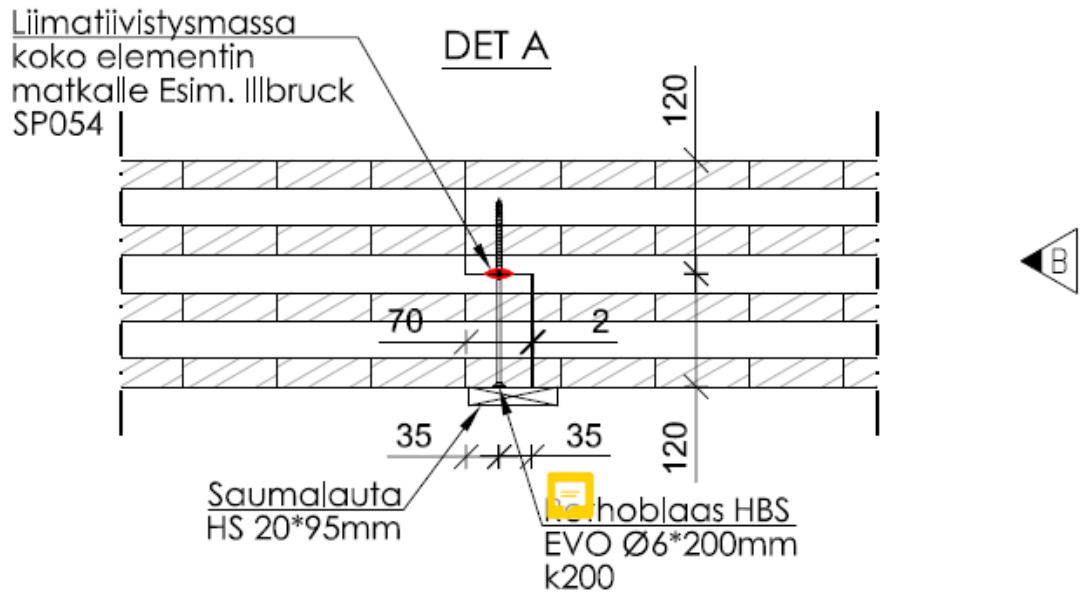
Kuva 12. Seinien US6 ja US9 välinen liitos

Ensimmäisen kerroksen lännenpuoleisen seinän elementtien liitos US11 ja US12, on DET09 kuva numero 11 mukainen.

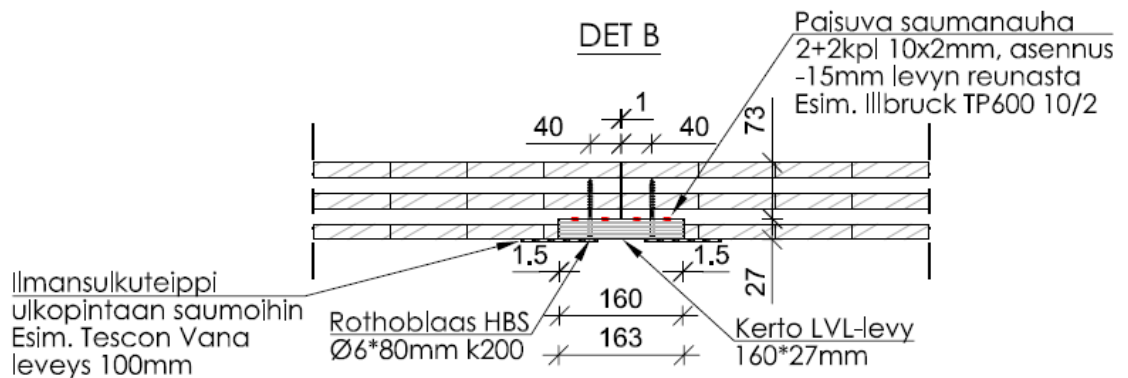


Kuva 13. Seinien US11 ja US5 välinen liitos

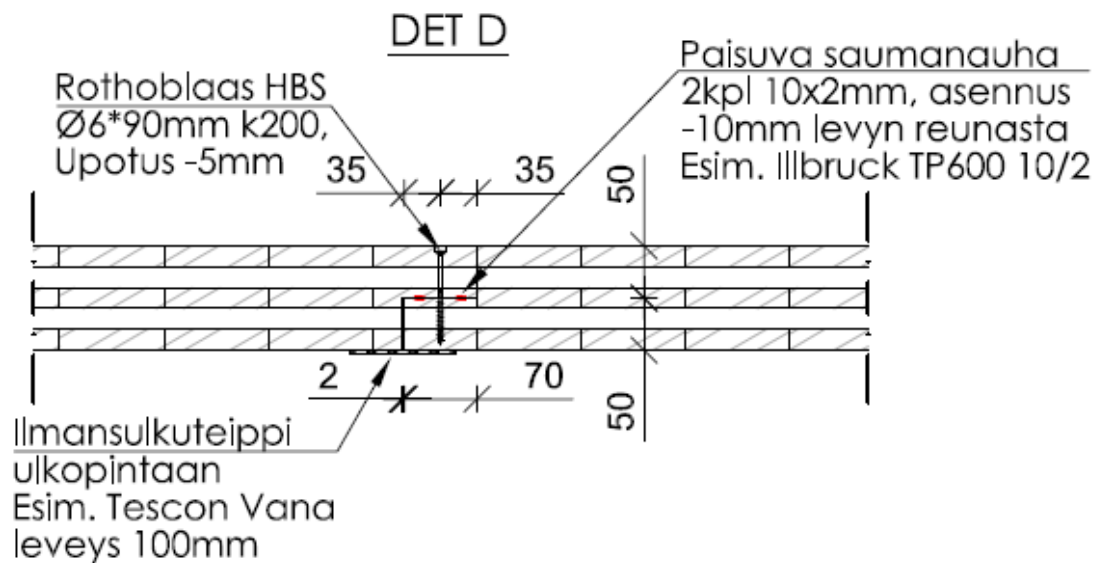
Rakennuksen toisen kerroksen CLT-elementtien välisissä liitoksissa on käytetty liimatiivistysmassaa, sekä paisuvaa saumanauhaa. Toisen kerroksen elementtien väliset liitokset ovat detaljien DET A, DET B ja DET D mukaiset. (Kuvat 13–15).



Kuva 14. 2krs. Liitosdetalji DET A

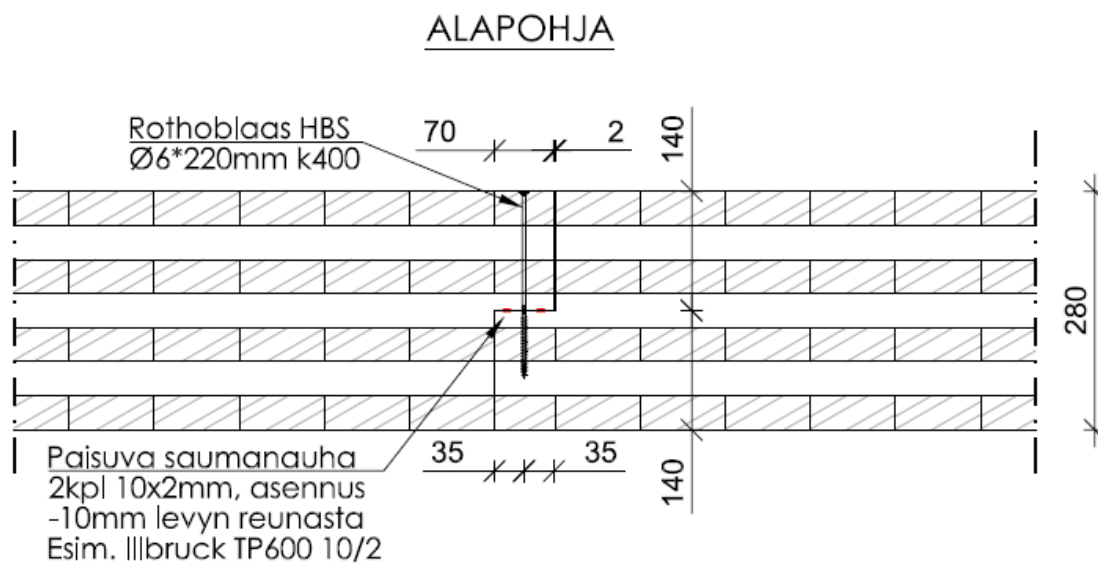


Kuva 15. 2krs.Liitosdetalji DET B



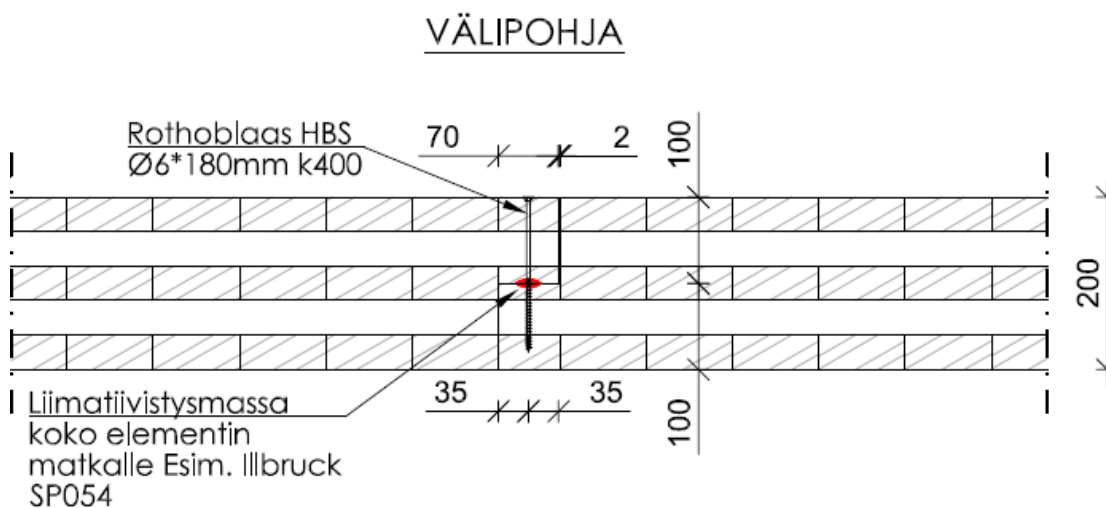
Kuva 16. 2krs. Liitosdetalji DET D

Alapohjan liitoksissa tiivistystuotteena on käytetty paisuvaasaumanauhaa ja liitos DET07, kuvan numero 16 mukainen.



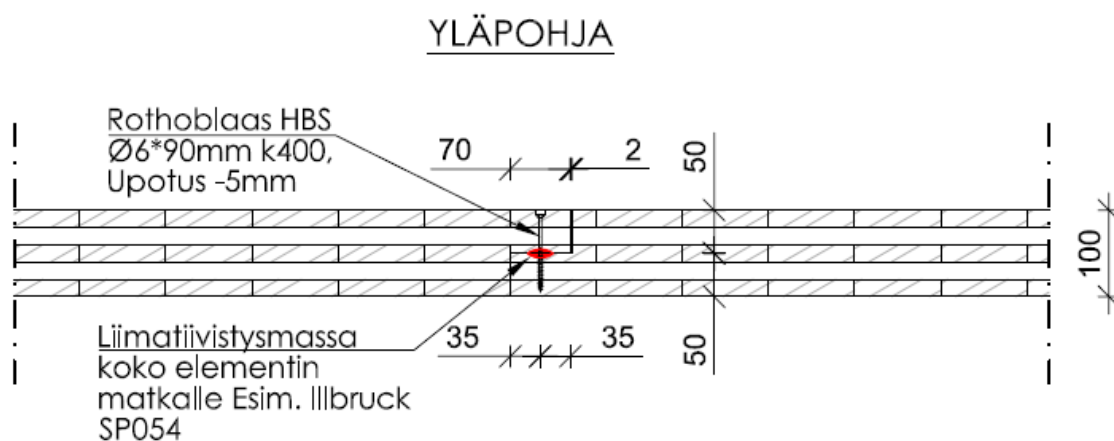
Kuva 17. Alapohjan liitosdetalji

Väliopohjassa on käytetty tiivistystuotteena liimatiivistysmassaa, liitos on kuvan numero 17 mukainen.



Kuva 18. Väliopohjan liitosdetalji

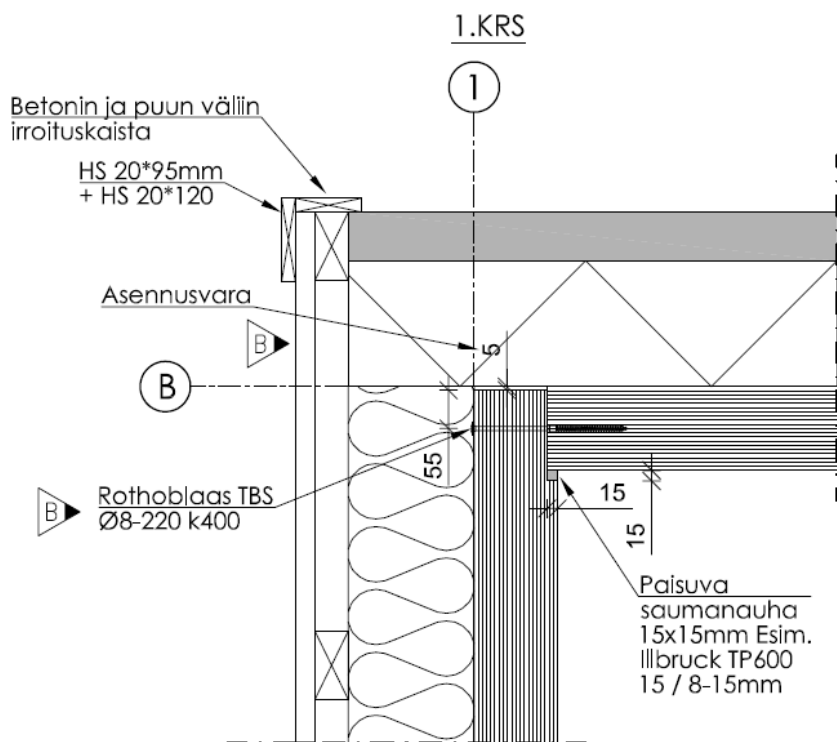
Yläopohjan liitoksen tiivistystuotteena on käytetty liimatiivistysmassaa, liitos on kuvan numero 18 mukainen.



Kuva 19. Yläpohjan liitosdetalji

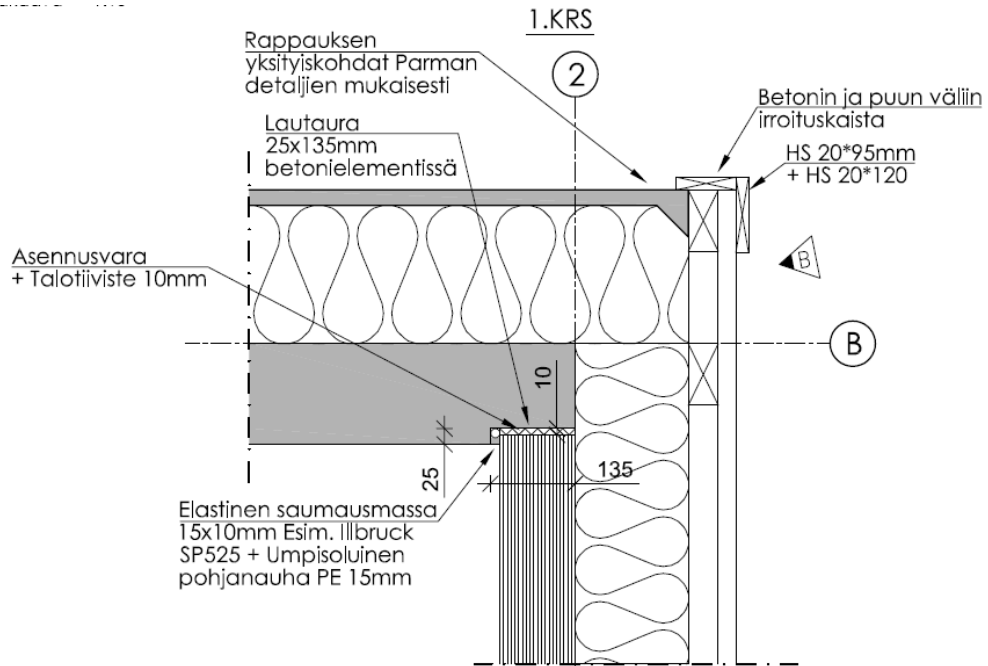
Nurkkaliitokset

Rakennuksen nurkkaliitoksissa on käytetty erilaisia kiinnitys ja tiivistys ratkaisuja. Ensimmäisen kerroksen lännen- ja pohjoisen puoleinen nurkkaliitos. Elementtien kiinnitys toisiinsa DET01 Rothoblaas TBS Ø8–220 jaolla k400 (Kuva 19).



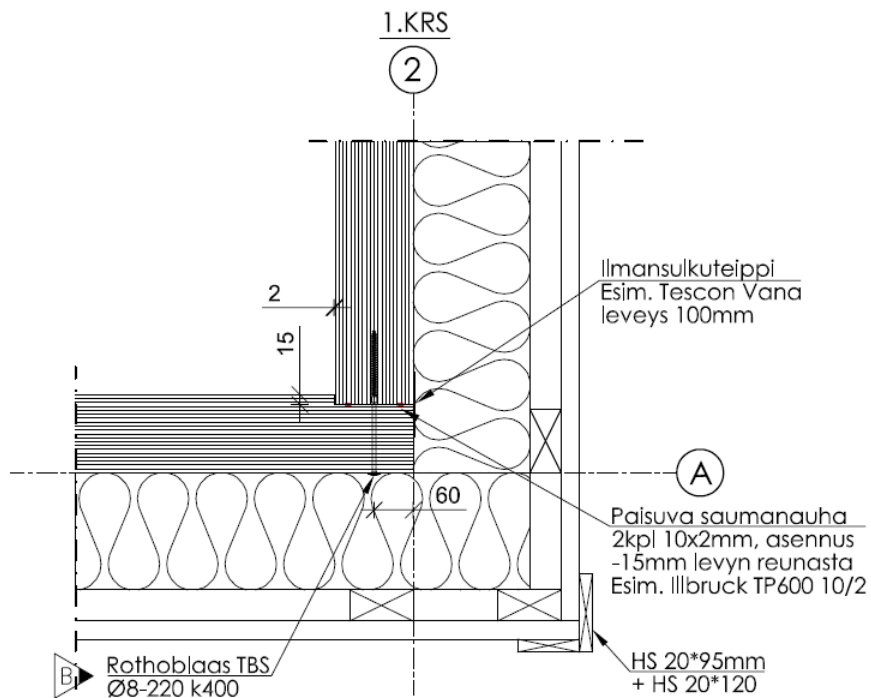
Kuva 20. Nurkkaliitos

Ensimmäisen kerroksen pohjoisen ja idänpuoleisen betoni- ja LVL-seinän nurkkaliitos DET02 (kuva 20).



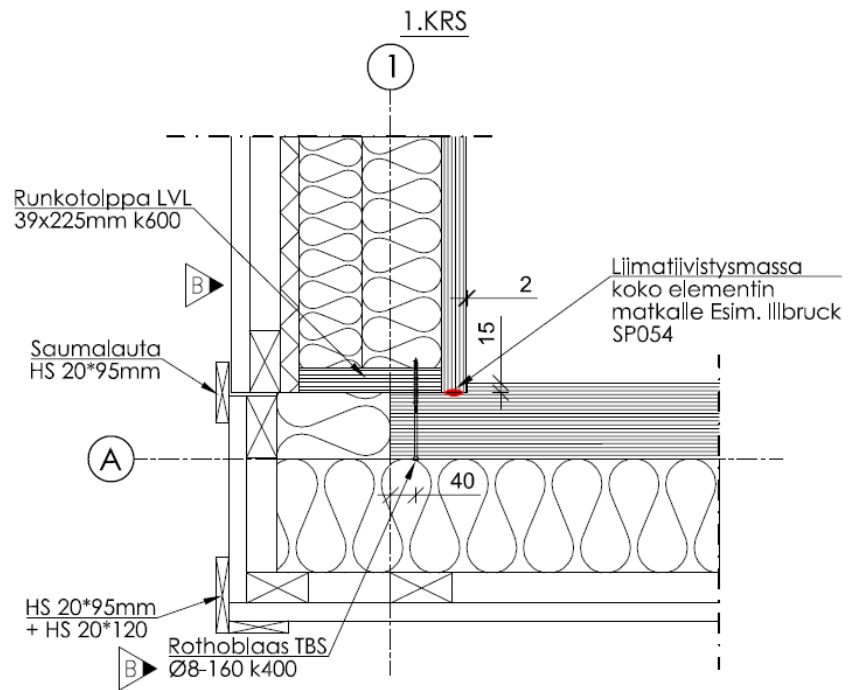
Kuva 21. Nurkkaliitos

Ensimmäisen kerroksen Idän- ja etelän puoleinen seinien nurkkaliitos DET03 (kuva 21).



Kuva 22. Nurkkaliitos

Etelän- ja lännen puoleinen seinien nurkkaliitos DET04 (kuva 22).



Kuva 23. Nurkkaliitos