



AFRY

Työterveyslaitos

Rakennusmateriaalien sisältämien PAH-yhdisteiden vaikutus sisäilman laatuun (PAHSIS)

Tutkimusprojektin loppuraportti

AFRY Rakennusfysiikka

Jarno Komulainen

Miia Pitkäranta

Pauli Sekki

Paula Wuokko

Työterveyslaitos

Aku Helin

Evgeny Parshintsev

Tiina Santonen

AFRY Buildings Finland Oy / Rakennusfysiikka
Linnoitustie 5
02600 Espoo

www.afry.fi
© 2024 kirjoittajat
Kansikuva: Paula Wuokko

Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston tuella.
Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.
ISBN 978-952-94-8968-8 (pdf)

Tiivistelmä

Suomalaisissa rakennustuotteissa on käytetty varsin yleisesti polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä eli PAH-yhdisteitä sisältäviä lähtömateriaaleja kuten kivihiilipikeä, kivihiilitervaa ja kreosoottijyä. PAH-yhdistepitoiset rakennustuotteet ovat tyypillisesti rakenteiden sisällä ja niiden vaikutukset sisäilmaan vaihtelevat hyvin paljon. On tavanomaista, että PAH-yhdistepitoiset materiaalit eivät aiheuta mitään havaittuja haittoja ja niiden olemassaolo selviää vasta rakenteita muista syistä avattaessa. Toisinaan PAH-yhdisteet kuitenkin aiheuttavat hajuhaittoja ja näihin liittyviä oireita.

PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien sisäilmavaarallisuuden arviointiin käytetään Suomessa yleisesti virheellisesti PAH(16)-yhdisteille annettuja vaarallisen jätteen raja-arvoja (Vna 221/2013). Kyseiset raja-arvot on asetettu työ- ja ympäristöturvallisuuden näkökulmasta ja tarkoitettu yksinomaan rakennusten purkujätteen käsittelyn ja sijoituksen arviointiin. Kyseisiä raja-arvoja ei ole tarkoitettu rakennusten käytettävyyden arviointiin tai korjaustarpeen ja korjaustapojen määrittämiseen. Koska rakenteissa olevien PAH-yhdistepitoisten materiaalien aiheuttamien riskien arviointiin ei sisäilman raja-arvojen lisäksi ole ollut saatavilla kattavaa ohjeistusta, on edellä mainittuja materiaalipitoisuuden raja-arvoja käytetty, mikä on johtanut riskien yliarviointiin sekä toisinaan "kaiken purkavaan" toimintatapaan, jolla voi laajetessaan olla merkittävää kansantaloudellista vaikutusta.

PAH-yhdistepitoisista rakennusmateriaaleista ja niiden päästöistä ei ole kansallisen rakennusterveyden näkökulmasta kirjoitettuja selvityksiä, ja kansainvälisestikin tietoa on niukasti; julkaistu tieto rakennusmateriaalien PAH-yhdistepäästöistä rajoittuu lähinnä tapauskuvauksiin. Ymmärrys PAH-yhdisteiden terveyshaitoista taas perustuu pitkälti 1900-luvun loppupuoliskolla julkaistuu toksikologiseen tietoon, ja epidemiologiseen näyttöön PAH-seosten haitoista liittyen työtehtäviin, joissa on altistuttu korkeille pitoisuuksille kuumissa prosesseissa syntyviä PAH-yhdistehuujuja. Näissä todellinen altiste sekä myös altistumisen mekanismi ovat eronneet merkittävästi rakennuksissa tapahtuvasta altistumisesta.

Yli puolet Suomen työpaikoista on toimistotyypisiä tai niihin rinnastettavia työpaikkoja. Koska PAH-yhdisteitä esiintyy rakennusmateriaaleissa edelleen melko yleisesti, sisäilman kautta potentiaalisesti PAH-yhdisteille altistuvia työntekijöitä on varsin suuri joukko.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tuottaa tietoa rakenteissa olevien PAH-yhdistepitoisten materiaalien aistinvaraisesti havaittavista ja mitattavista sisäilmavaikutuksista ja näiden yhteydestä materiaalin PAH-yhdistepitoisuuteen ja -yhdistekirjoon. Tutkimus oli luonteeltaan laadullinen ja siinä pyrittiin kartoittamaan materiaalin ja sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksien lisäksi tarkasti myös muita materiaalin sisäilmahaittoihin vaikuttavia osatekijöitä. Kokeellisen osion lisäksi raporttiin on koottu kattavasti tietoa mm. PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien käytön historiasta ja käyttötavoista sekä muuta perustietoa PAH-yhdisteiden problematiikan arvioinnin tueksi.

Tutkimuksen kokeellisessa osassa mitattiin myös PAH-yhdistepäästöjä todellisten vanhojen rakennuskohteiden rakenteista irrotetuista materiaalikappaleista koekammiossa. Laskennallisella tarkastelulla pystyttiin tuottamaan lisäarvoa kokonaisriskin tarkasteluun riskin aiheuttavan materiaalin selvittämiseksi laskennallisen SER-pintatuoton ja SER-kammiotuloksen vertailulla sekä todennäköisen PAH-yhdisteiden siirtymismuodon arvioimisella. Osana tutkimusta selvitettiin ajantasaisin menetelmin myös naftaleenin hajukynnys, jonka osalta kirjallisuustieto on ollut hyvin vaihtelevaa. Hajukynnykseen perustuva kriittisen materiaalipitoisuuden määrittäminen todettiin kuitenkin soveltumattomaksi tarkastelumenetelmäksi.

Tutkimuksen perusteella materiaalin PAH-yhdistepitoisuus ei korreloinut sisäilmasta mitattavien PAH-yhdistepitoisuuksien kanssa; korkeakaan PAH-yhdistepitoisuus materiaalissa ei nostanut sisäilmapitoisuuksia, kun materiaali oli rakenteiden sisällä koskemattomassa tilassa. Sisäilman PAH-yhdistepitoisuudet olivat useimmissa kohteissa normaalitilanteessa hyvin matalia ja poikkeavat hajut vähäisiä, tai niitä ei havaittu lainkaan. Alipaineisuuden vaikutus sisäilmapitoisuuksiin oli tutkituissa kohteissa vähäinen. Sitä vastoin rakenteen avaaminen ja erityisesti PAH-yhdistepitoisen materiaalin rikkominen aiheutti tyypillisesti voimakkaita päästöjä, joiden suuruus oli riippuvainen materiaalin PAH-yhdistepitoisuudesta.

Tulosten perusteella merkittävä altistuminen PAH-yhdisteille toimistotyypisissä työympäristöissä rakennuksen normaalissa käyttötilanteessa on epätodennäköistä. Rakenteiden avaaminen ja purkutyö sitä vastoin voivat aiheuttaa merkittävääkin altistumista, mikäli työturvallisuudesta ja ympäristön suojaamisesta ei huolehdita.

Tutkimuksen tulosten perusteella sisäilman naftaleenipitoisuus tai naftaleenille tyypillinen haju eivät yksinään sovellu rakennusmateriaaliperäisten PAH-yhdistepäästöjen indikaattoriksi, vaan lisäksi tulee arvioida muiden PAH-yhdisteiden, kuten fenantreenin pitoisuuksia ja PAH-yhdisteseoksille tyypillistä ”rapapölkyn” hajua.

Projektin tuloksia voidaan hyödyntää sisäilmaongelmien ratkaisemisessa sekä korjaus- ja purkutarpeen arvioinnissa. Tulosten perusteella materiaalin PAH-yhdistepitoisuus ei kuvasta suoraan materiaalin aiheuttamaa haittaa, vaan haitan arvioinnissa on ensisijaisen tärkeää tutkia päästöriskiksi arvioitu materiaali, rakenne ja siihen kohdistuvat rasiustekijät kokonaisuutena. Epäiltyjen haittojen arvioinnissa voidaan käyttää tilojen normaaleissa käyttöolosuhteissa otettuja sisäilman PAH-yhdistenäytteitä. Näytteenotossa tulee huomioida mahdolliset toistuvat olosuhdevaihtelut esimerkiksi rakenteen lämpöolosuhteissa. Rakenteen lämpeneminen saattaa lisätä päästöjä merkittävästi. Tarvittaessa näytteenottoja tulee keskimääräisten päästötasojen arvioimiseksi toistaa eri olosuhteissa, esimerkiksi eri vuodenaikoina. Kirjallisuuden ja tutkimustulosten perusteella on esitetty etenemismalli PAH-yhdistepitoisten materiaalien haittojen ja tarpeellisten korjaustoimenpiteiden arvioimiseksi.

Abstract

Materials containing polycyclic aromatic hydrocarbons or PAH compounds, such as coal pitch, coal tar and creosote oil, have been used quite commonly in Finnish building materials. Materials and products containing PAH compounds are typically found within structures, and their impact on indoor air quality can vary significantly. Sometimes, PAH compounds cause odor-related issues and associated symptoms, while at other times, their presence remains unnoticed until structures are opened for other reasons.

In Finland, there is a common but incorrect practice of using the hazardous waste threshold values for PAH(16) compounds (according to Vna 221/2013) to assess the indoor air safety of PAH-containing building materials. These threshold values were originally established for the purpose of evaluating the handling and disposal of demolition waste from buildings, considering both occupational safety and environmental aspects. However, these specific threshold values were not intended for assessing building usability or determining repair needs and methods. Unfortunately, due to the lack of alternative threshold values or clear guidelines for evaluating the risks posed by PAH-containing materials in structures, the aforementioned hazardous waste thresholds have been used. This approach has led to overestimation of risks and, at times, a "demolish everything" mindset, which could have significant economic implications if widely adopted.

Regarding PAH-containing building materials and their emissions, there is a dearth of national research from the perspective of building health. Internationally, information is also limited, with published data on PAH emissions from building materials primarily consisting of case studies. Our understanding of the health hazards associated with PAH compounds largely relies on toxicological knowledge published in the latter half of the 20th century and epidemiological evidence related to work tasks involving exposure to high concentrations of PAH fumes generated in processes that include heating of PAH containing materials. In these cases, the actual exposure and the mechanism of exposure significantly differ from exposure occurring within buildings.

Over half of Finland's workplaces are office-type or similar. Since PAH compounds are still relatively common in building materials, there is a considerable group of workers who may potentially be exposed to PAH compounds through indoor air. The purpose of this study was to provide information on the perceptible and measurable indoor air effects of PAH-containing materials within structures, as well as their connection to material PAH concentrations and profiles. The study was qualitative in nature, aiming to identify factors affecting indoor air quality related to PAH-containing materials, in addition to assessing material and indoor air PAH levels. Alongside the experimental section, the report comprehensively compiles information on the historical use and practices of PAH-containing building materials, providing essential context for evaluating PAH-related problematics.

In the experimental part of the study, PAH compound emissions were measured also from material samples detached from actual old building structures using a test chamber. Through computational analysis, additional insights were gained for assessing overall risk by comparing the calculated surface emission rate (SER) with the SER obtained from the chamber results. Additionally, the likely mode of PAH compound transfer was evaluated. As part of the study, the odor threshold for naphthalene was also investigated using up-to-date methods, as literature data on this topic has been quite variable. However, determining the critical material concentration based on odor thresholds was found to be an unsuitable assessment method.

Based on the research, the PAH compound concentration in the material did not correlate with the PAH levels measured in indoor air. Even when the material had a high PAH concentration, it did not significantly elevate indoor air concentrations when the material remained undisturbed within the building structure. In most cases, indoor PAH levels were very low under normal conditions, and any unusual odors were minor or absent. The impact of negative pressure on indoor air concentrations was negligible in the studied locations. However, opening structures and, especially, disturbing PAH-containing materials typically resulted in strong emissions, with emission magnitude dependent on the material's PAH concentration.

Based on these findings, significant exposure to PAH compounds in office-type work environments during normal building use is unlikely. However, during demolition work or when structures are opened, there can be substantial exposure if proper safety precautions are not followed.

Based on the results of the study, indoor naphthalene concentration or the typical odor associated with naphthalene alone does not serve as a reliable indicator for PAH compound emissions originating from building materials. Instead, it is essential to assess other PAH compounds, such as phenanthrene levels, and consider the characteristic "railroad tie" odor associated with PAH compound mixtures.

The findings from this project can be valuable for addressing indoor air quality issues and evaluating repair and demolition needs. Based on the results, the PAH compound content of the material does not directly reflect the harm caused by the material. Therefore, it is crucial to examine the material, structure, and overall factors related to the material when assessing potential harm. For evaluating suspected issues, indoor air samples of PAH compounds collected under normal usage conditions can be utilized. During sampling, it is essential to account for possible variations in environmental conditions, such as temperature changes within the structure. Warming of the structure may significantly increase emissions. If necessary, repeated sampling under different conditions (e.g., during different seasons) is recommended to assess average emission levels. Based on the literature and present results, we suggest a step-by-step procedure for evaluating the harms of PAH compound-containing building materials and determining necessary remedial actions.

Alkusanat ja kiitokset

Tämän tutkimuksen taustalla oli valtakunnallinen tarve yhdenmukaistaa PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien sisäilmavaikutusten arviointia. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tuottaa tietoa rakenteissa olevien PAH-yhdistepitoisten materiaalien aistinvaraisesti havaittavista ja mitattavista sisäilmavaikutuksista ja näiden yhteydestä materiaalin PAH-yhdistepitoisuuteen ja -yhdistekirjoon. Aihepiirin kokoavan kirjallisuuden ollessa hajanaista raporttiin koottiin myös kattava kirjallisuuskatsaus mm. PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien käytön historiasta ja käyttötavoista sekä muuta perustietoa PAH-yhdisteiden problematiikan arvioinnin tueksi.

Tutkimusprojekti toteutettiin Työsuojelurahaston rahoituksella (Työsuojelurahaston hankenumero 210096). Lisäksi hanketta rahoittivat AFRY Buildings Finland Oy, Työterveyslaitos, Mapei Oy, Ardex Oy, Kiilto Oy, TKR-Marketing Oy ja Betton Oy.

Tässä loppuraportissa on kuvattu kattavasti tutkimuksen toteutus ja tulokset. Lisäksi hankkeessa tuotetaan konferenssijulkaisuja ja tieteellinen julkaisu.

Raportin kirjoittajien vastuualueet jakautuivat seuraavasti: tutkimuksen, aineiston ja tutkimusasetelman suunnittelu: Jarno Komulainen, Evgeny Parshintsev, Miia Pitkäranta ja Paula Wuokko; kenttätutkimusten koordinointi ja vastaava tutkija: Paula Wuokko; kirjallisuuskatsaus ja raportin vastuukirjoittaja: Miia Pitkäranta; laboratorioanalyysit: Aku Helin; laskennalliset analyysit ja mallinnus: Pauli Sekki. Kaikki kirjoittajat osallistuivat raportin kirjoitukseen ja tarkastukseen. Lisäksi Työterveyslaitoksen tutkimusprofessori Tiina Santonen tarkasti raportin ja osallistui sen kirjoitukseen PAH-yhdisteiden terveysvaikutusten näkökulmasta.

Kirjoittajien lisäksi työn toteutukseen osallistuivat AFRYllä Mikko Koskivuori (hankeryhmän puheenjohtaja, työn koordinointi); Terhi Markkula (kenttätutkimukset ja mittaukset kohteissa), Kyösti Nieminen (rakennekuvat), Anu Laurila ja Jaakko Sänntti (kirjallisuuskatsauksen aineiston hankinta), Jere Pylkkänen (rakennusmateriaalinäytteiden työstäminen); Eero Saleva (mallinnus); Anna Karpoja (avustavat työt) ja Työterveyslaitoksella Outi Kammonen ja Tuula Huuskonen (materiaali- ja ilmanäytteiden analysointi) sekä Niina Ahonen (emissionäytteet).

Hankkeen ohjausryhmässä toimivat Kimmo Ahonen, Senaatti-Kiinteistöt: Selja Flink, Senaatti-Kiinteistöt; Seija Linnanmäki, Museovirasto; Kati Järvi, Turun kaupunki; Johanna Kaipia, Turun kaupunki; Kirsi Torikka, Helsingin kaupunki; Hanna Tuovinen, Puolustuskiinteistöt; Katri Leino, Rakennustieto; Pertti Metiäinen ja 1.9.2022 alkaen Titta Manninen, Valvira; Mikael Saarinen, Työsuojelurahasto; Sami Vuorikoski, Mapei Oy; Heikki Immonen, Ardex Oy; Saana Leppänen, Kiilto Oy; Mika Ronkainen, Kiilto Oy; Matti Raatikainen, TKR-Marketing Oy; Markku Hyvärinen, TKR-Marketing Oy ja Juha Tamminen, Betton Oy.

Kirjoittajat esittävät kiitokset kaikille hankkeeseen osallistuneille sekä yhteistyökumppaneille, joiden ansiosta tutkimukset todellisissa rakennuskohteissa olivat mahdollisia. Lämmin kiitos ohjausryhmälle projektin seurantaan osallistumisesta sekä arvokkaista ja kehittävästä kommentista raportin käsikirjoitukseen.

Espoossa 15.3.2024

Sisällys

1	Johdanto ja kirjallisuuskatsaus	11
1.1	PAH-yhdistepitoiset materiaalit suomalaisessa rakentamisessa	11
1.1.1	Kivihiiliterva, kivihiilipiki ja kreosoottioöljy	11
1.1.2	PAH-yhdistepitoiset rakennusmateriaalit ja esiintyminen suomalaisessa rakennuskannassa	15
1.1.3	Rakennusmateriaaleja koskeva lainsäädäntö	21
1.1.4	Kivihiilitervapohjaisten rakennusmateriaalien PAH-yhdistekoostumus	22
1.1.5	Bitumipohjaisten rakennusmateriaalien PAH-yhdistekoostumus..	25
1.1.6	PAH-yhdisteet suomalaisissa haitta-ainenäytteissä	26
1.2	PAH-yhdisteet sisäilmassa	28
1.2.1	PAH-yhdistepitoisuudet suomalaisten rakennusten sisäilmassa ..	28
1.2.2	Rakennusmateriaaliperäiset PAH-yhdisteet sisäilmassa	29
1.2.3	PAH-yhdisteiden taustatasot ja muut lähteet	29
1.2.4	PAH-yhdisteiden hajukynnykset.....	31
1.2.5	Sisäilmapitoisuuksien ohje-, raja- ja viitearvot.....	32
1.3	PAH-yhdisteiden haitalliset ominaisuudet.....	33
1.4	PAH-yhdisteiden mittausmenetelmät.....	35
1.4.1	Ilmanäytteet.....	35
1.4.2	Materiaalinäytteet	36
1.4.3	Rakennusmateriaalien emissioiden tutkimusmenetelmät.....	36
1.5	PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien päästöjen hallinta	39
1.5.1	Haitta-ainetutkimus.....	39
1.5.2	Toimenpidetarpeen arviointi, kansalliset ohjeet	40
1.5.3	PAH-yhdistepitoisen materiaalin purku, rakenteiden korjaus- ja hallintamenetelmät	41
2	Tutkimusasetelma, aineisto ja menetelmät	43
2.1	Tutkimusasetelma	43
2.2	Tutkimuskohteet ja -materiaalit	43
2.2.1	Kohde 1	44
2.2.2	Kohde 2	46
2.2.3	Kohde 3	46
2.2.4	Kohde 4	52
2.2.5	Kohde 5	60
2.2.6	Yhteenvedo tiloista ja materiaaleista.....	64
2.3	Sisäilmaolosuhteiden ja muiden taustatekijöiden mittaukset	65
2.3.1	Sisäilman laadun aistinvarainen arviointi.....	65
2.3.2	Lämpötila	65
2.3.3	Ilmankosteus	66
2.3.4	Ilmanvaihto	66

2.3.5	Painesuhteet	66
2.4	Rakennusmateriaalien tutkimukset	67
2.4.1	Rakennusmateriaalien irrotus ja käsittely	67
2.4.2	Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet	68
2.4.3	Kokonaisemissio- eli bulk-tutkimukset	69
2.4.4	Pintaemissiotutkimukset kammiotekniikalla	69
2.5	PAH-yhdisteiden sisäilmamittaukset	70
2.5.1	Sisäilmamittaus normaaliolosuhteessa	70
2.5.2	Sisäilmamittaus tila alipaineistettuna	70
2.5.3	Sisäilmamittaus rakenteiden avaamisen jälkeen	71
2.5.4	Sisäilmanäytteiden analyysi	71
2.5.5	Sisäilmanäytteenottoon liittyneet huomiot	72
2.6	Hajukynnyksen määrittäminen	73
2.7	Materiaalipäästöjen laskennallinen tarkastelu	75
2.7.1	Ehjän rakenteen <i>SER</i> -pintatuotto sekä suojaavan rakenteen <i>D_{Naftaleeni}</i>	76
2.7.2	Naftaleenin kriittisen materiaalipitoisuuden määrittäminen hajukynnyksen perusteella	76
3	Tulokset	78
3.1	Kohteissa todetut PAH-yhdistepitoiset rakennustuotteet ja niiden päästöt	78
3.1.1	Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet	78
3.1.2	Materiaalien emissiopotentiaali (bulk)	80
3.1.3	Materiaalien pintaemissiot (<i>SER</i>) koekammiossa	80
3.1.4	Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet, laboratorioden välinen vaihtelu	81
3.2	Kohdetilojen PAH-yhdisteiden sisäilmapitoisuudet	82
3.2.1	Tutkittujen tilojen sisäilmapitoisuudet eri olosuhteissa	82
3.2.2	Tilojen välinen vaihtelu	85
3.3	Kohdetilojen olosuhteet	87
3.3.1	Aistinvaraisesti arvioitu sisäilmanlaatu	87
3.3.2	Lämpötila ja ilmankosteus	87
3.3.3	Ilmanvaihdon toiminta	89
3.3.4	Painesuhteet ja ilmatiiveys	90
3.4	Naftaleenin hajukynnyksen määrittäminen tulokset	92
3.5	Laskennallisten tarkastelujen tulokset	92
3.5.1	Ehjän rakenteen laskennallinen pintatuotto ja suojaavan rakenteen <i>D_{Naftaleeni}</i>	92
3.5.2	Naftaleenin kriittisen materiaalipitoisuuden määrittäminen hajukynnyksen perusteella	93
4	Tulosten tarkastelu	94
4.1	Materiaalien PAH-yhdistepitoisuuden vaikutus sisäilman PAH-yhdisteisiin ja sisäilman aistinvaraisesti arvioituun laatuun	94

4.2	Sisäilmasta mitattujen PAH-yhdisteiden yhteys sisäilman aistinvaraisesti arvioituun laatuun.....	97
4.3	Materiaalien PAH-yhdistepitoisuuden ja bulk-emissioiden vertailu	99
4.4	Laskennallisten tarkastelujen perusteella tehtävä analyysi.....	100
4.5	PAH(16)-listan ulkopuolisten PAH-yhdisteiden esiintyminen	100
4.6	Sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin vaikuttavat olosuhde- ja rakennetekijät	102
4.7	Etenemismalli PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien aiheuttamien riskien ja toimenpidetarpeiden arvioimiseen	103
5	Johtopäätökset ja pohdinta	105
	Lähteet.....	110

Liitteet

- Liite 1. Rakennusmateriaalinäytteiden PAH(16+6)-analyysien tulokset
- Liite 2. Bulk-emissiomittausten tulokset
- Liite 3. Koekammiossa tehtyjen emissiomittausten tulokset
- Liite 4. Tutkittujen tilojen sisäilmanäytteiden PAH(16+2)-analyysin tulokset
- Liite 5. Sisäilmanäytteiden PAH(16+2)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysit

1 Johdanto ja kirjallisuuskatsaus

1.1 PAH-yhdistepitoiset materiaalit suomalaisessa rakentamisessa

Rakennustuotteissa on 1800- ja 1900-luvuilla käytetty vaihtelevia määriä polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä eli PAH-yhdisteitä sisältäviä lähtömateriaaleja. PAH-yhdisteet ovat niimensä mukaisesti useita aromaattisia renkaita sisältäviä hiilivetyjä. Erilaisia PAH-yhdisteitä on olemassa runsaasti, mutta yleensä muutamia kymmeniä esiintyy korkeina pitoisuuksina rakentamisessa käytetyissä materiaaleissa.

PAH-yhdistepitoisia tuotteita on käytetty rakentamisessa niiden biosidisten ominaisuuksien, hitaan biohajoavuuden ja vesitiiveyden/vettä hylkivyyden vuoksi. Nämä ominaisuudet ovat suojanneet PAH-yhdistepitoisilla tuotteilla käsitellyjä materiaaleja ja rakenteita kosteudelta, mikrobeilta, lahottajilta ja tuohyönteisiltä. Esimerkiksi kreosoottijäykäsittelyn on arvioitu pidentävän ratapölkkyjen elinkaarta viidestä kolmeenkymmeneen vuoteen (Bolin ym., 2013).

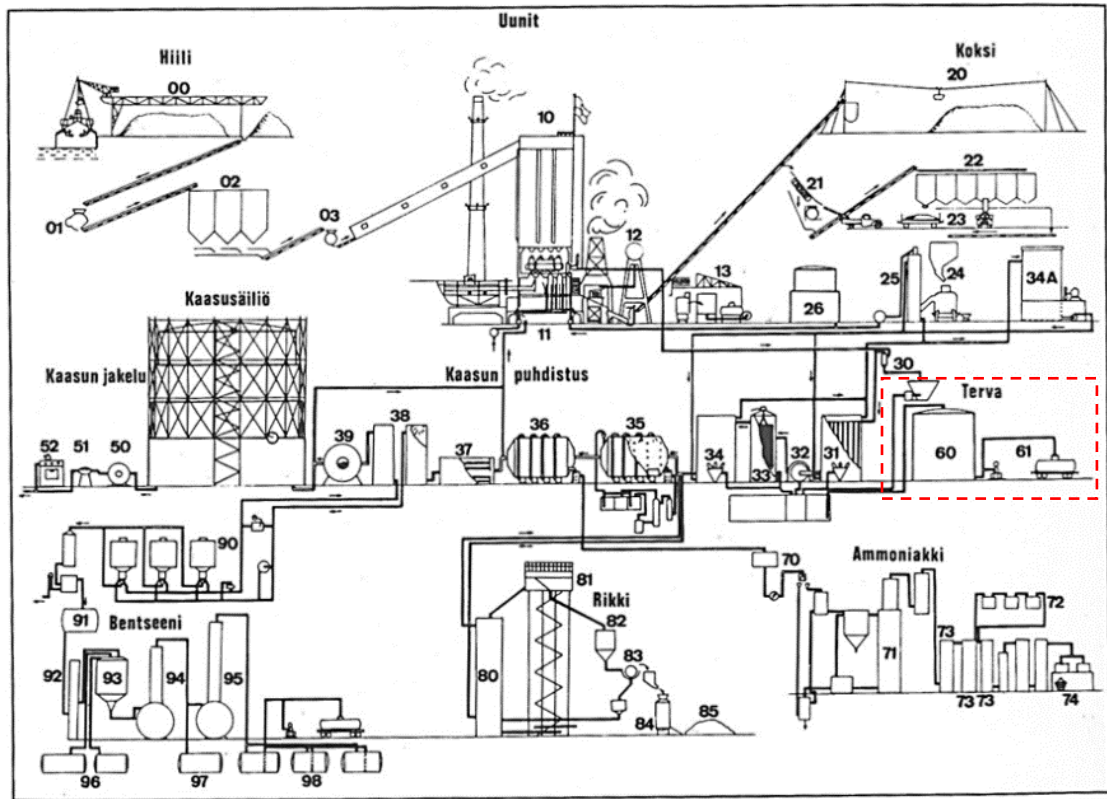
1.1.1 Kivihiiliterva, kivihiilipiki ja kreosoottijäykä

Vanhoissa rakennustuotteissa todettavien merkittävien PAH-yhdistepitoisuuksien lähteenä ovat tuotteessa käytetyt kivihiilitervapohjaiset aineet.

Kivihiilitervaa syntyy sivutuotteena valmistettaessa kivihiilestä koksia kuivatuslauksen eli koksauksen (eng. carbonization) avulla (kuvat 1 ja 2). Koksi on kivihiiltä puhtaampaa ja lämpöarvoltaan parempaa polttoainetta, ja sitä käytetään muun muassa terästeollisuudessa. Koksauksen tapahtuu korkeassa lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa ja sen tuotteena syntyy kivihiilitervan lisäksi myös mm. koksikaasua, vettä, ammoniakkia ja rikkiyhdisteitä (kuva 2). Jatkojalostamalla tislamalla (eng. distillation) kivihiilitervasta saadaan edelleen kreosoottijäykä ja kivihiilipikeä. Kivihiilitervaa, kreosoottijäykä ja kivihiilipikeä, jotka poikkeavat toisistaan olomuodoltaan, on käytetty Suomessa rakennustuotteissa erilaisissa tarkoituksissa.



Kuva 1. Kivihiilitervapohjaisten tuotteiden valmistus. Lähde: Airaksinen ym., 2023.



0	HIILI	22	Lajittelu	35	Naftaleenipesuri	7	AMMONIAKKI	9	BENTSEENI
00	Purkaus ja varastointi	23	Jakelu	36	Ammoniakkipesuri	70	Ammoniakkiveisi	90	Aktiivihiliadsorberit
01	Murskaus	24	Generaattori	37	Puhdistusmassa-arkut	71	Hiilihapon ja rikki-vedyn erotuskolonne	91	Raakabentseeni
02	Sekoitus	25	Generaattorikaasun jäähditys	38	Kaasun jäähdyttimet	72	Lipeä- ja öljynsuodattimet	92	Esitislauskolonne
03	Jauhatus	26	Generaattorikaasusäiliö	39	Kaasumittari	73	Puuhiliisuodattimet	93	Pesuri
1	UUNIT	3	KAASUN PUHDISTUS	4	KAASUSÄILIÖ	74	Valmis ammoniakki-liuos	94	Jakotislauskolonne
10	Hiilisäiliö	5	KAASUN JAKELU	5	KAASUN JAKELU	8	RIKKI	95	Hienotislauskolonne
11	Uunit	6	TERVA	6	TERVA	80	Pesutorni	96	Rikkihappo- ja natrionlipeäsäiliöt
12	Koksin märkäsammutus	7	SÄILIÖ	7	SÄILIÖ	81	Hapetustornit	97	Välitulokset
13	Koksin kuiva-sammutus	8	JAKELU	8	JAKELU	82	Rikkivaahdon kokooja	98	Valmistuotteet bentseeni, tolueni, ksyleeni
2	KOKSI	9		9		83	Painesuodatin		
20	Varasto	10		10		84	Autoklaavi		
21	Murskaus	11		11		85	Rikki		
		12		12					
		13		13					
		20		20					
		21		21					
		22		22					
		23		23					
		24		24					
		25		25					
		26		26					
		30		30					
		31		31					
		32		32					
		33		33					
		34		34					
		34A		34A					
		38		38					
		39		39					
		39		39					
		50		50					
		51		51					
		52		52					
		91		91					
		92		92					
		93		93					
		94		94					
		95		95					
		96		96					
		97		97					
		98		98					

Kuva 2. Kivihiilitervan, kaasun ja muiden tuotteiden synty koksausprosessissa. Lähde: Herranen, 1985.

Taulukossa 1 on esitetty kivihiilitervapohjaisten aineiden perusominaisuuksia. Kivihiilitervapohjaisille aineille on lähtömateriaalista ja tuotantoprosessista riippuen lukuisia eri nimikkeitä ja CAS-numeroita. Taulukossa on esitetty yleisimmin käytetyt.

Taulukko 1. Kivihiilitervapohjaisten aineiden ominaisuuksia.

Tuote	Olmuoito, ominaisuuksia	CAS-numero
Kreosoottiöljy	Kellertävän ruskea, öljyinen neste	61789-28-4
Kreosootti/kreosoottiöljy	Kellertävänruskea, öljyinen neste, standardin EN 13991:2003 mukainen tuote	8001-58-9
Kivihiiliterva	Lähes musta, viskoosi neste tai puolikiinteä, ei tarkoin määritelty	8007-45-2
Kivihiilipiki, CTPHT (coal tar pitch, high temperature)	Musta, kiiltävä, amorfinen kiinteä aine, ei tarkoin määritelty	65996-93-2

Puu- ja kivihiilitervan valmistuksen ja käytön historiaa

Puutervaa on käytetty vuosisatoja veden ja kosteuden kanssa kosketuksissa olevien puumateriaalien suojaamiseen lahoamista vastaan. Vuonna 1716 Englannissa patentoitiin laivanrakennuksessa käytettyjen lankkujen puunsuojauksessa käytetty tuote, jonka yhtenä komponenttina oli puutervan tisle, *"oyle or spirit of tarr"*. (Smith, 2020) Nimi "kreosootti" viittasi alun perin nimenomaan tämän tyyppiseen puutervan tisleeseen, jonka havaittiin hidastavan paitsi puun lahoamista, myös lihan pilaantumista (Ambrose, 2018). Nimen "kreosootti" johti vuonna 1832 saksalainen kemisti Karl Ludvig Reichenbach (1788–1869) muinaiskreikan sanoista *kréas* (liha) ja *sôtér* (säilyttäjä). Teollinen menetelmä puun kyllästämiseksi kreosoottijäljellä patentoitiin Englannissa vuonna 1838, mistä alkoi kreosoottikyllästetyn puun kaupallinen tuotanto (Bolin ja Smith, 2013). Kreosoottikyllästetty puu oli maailmalla merkittävässä roolissa mahdollistamassa mm. laajojen rautatieverkostojen rakentamisen 1800-luvun loppupuolelta alkaen.

Brittein saarten metsien huvetessa 1700-luvulla ja 1800-luvun alkupuolella puutervalle pyrittiin löytämään vaihtoehtoja. Puun suojauksessa ominaisuuksiltaan jopa paremmaksi havaittiin kivihiilen kuivatuslauksessa syntyvä kivihiiliterva ja siitä tislattu öljy. Myös kivihiilitervan tislettä alettiin kutsua kreosoottijäljeksi (Townsend, 2003; Ambrose, 2018). Vaikka sekä puu- että kivihiilitervajohdannaisia on kutsuttu yleisnimellä "kreosootti", kivihiiliterva ja siitä tislattu kreosoottijäljy eroavat sekä kemialliselta koostumukseltaan että monilta ominaisuuksiltaan puutervasta ja sen tisleistä. (Ambrose, 2018). Tämä tiedostettiin jo varhaisessa vaiheessa, esimerkiksi Suomen Teollisuuslehdessä vuonna 1884 julkaistun artikkelin mukaan kivihiilitervassa oli puutervasta poiketen *kreosootin* sijaan *samankaltaista ainetta karbolihappoa* (V. N, 1884). Terminologia on kuitenkin ollut sekavaa, esimerkiksi kotimaisessa julkaisussa vuodelta 1947 kreosoottijäljyn kerrotaan tarkoittavan niin puu-, kivi- ja ruskohiilitervasta saatua öljymäistä tislettä, jota käytetään mm. puun kyllästyksen ja erilaisten desinfiointiaineiden valmistukseen (Stigell, 1947).

Kivihiilen kuumennuksessa syntyy kocsin lisäksi kaasuja, joita on hyödynnetty mm. terästehtaiden ja kaupunkien energianlähteenä (ns. hiilikaasu, koksikaasu, valokaasu ja kaupunkikaasu). Kaupunkien kaasulaitoksissa ensisijainen tuote oli kaasu. Koksi ja terva olivat laitoksen sivutuotteita. Kivihiilitervan ja sen johdannaisten käytöstä tulikin laajamittaista vasta kaasulaitosten yleistymisen myötä 1800-luvun loppupuolella (Townsend, 2003). Suomessa Helsingin Kaasuvalaistusosakeyhtiö aloitti kaasu-jakelun vuonna 1860. Ensimmäinen kaasutehdas sijaitsi nykyisen Postitalon ja Kiasman alueella. Kaasua käytettiin yhtiön nimen mukaisesti aluksi vain kaupungin valaistukseen. Vuoteen 1882 asti laitos käytti kaasun raaka-aineena puuta (puukaasu), sen jälkeen lähinnä kivihiiltä. Vuosina 1973–1990 kaupunkikaasuna käytettiin butaania. Keskustan tehtaan lopetettua ilmansaasteongelmien takia, jatkoi kaasulaitostointia vuodesta 1910 alkaen uusi yksikkö Sörnäisten Suvilahdessa. (Herranen, 1985; Schönach, 2008)

Koksia on käytetty Suomessa 1800-luvun lopulta 1900-luvun lopulle mm. kerrostalojen kesku-lämmityspannujen, kaukolämpölaitosten ja terästeollisuuden lämmönlähteenä. Vielä 1870-luvulla kivihiili oli Suomen Kuvalehden silloisen artikkelin perusteella varsin tuntematon polttoaine (N.N. 1879). Kivihiilen ja kocsin tuonti Suomeen lisääntyi voimakkaasti 1800-luvun loppupuolella, esimerkiksi 1890-luvulta 1910-luvulle tuontimäärät kasvoivat yli viisinkertaisiksi. Sotien aikana palattiin puun käyttöön, koska kivihiilen tuonti loppui väliaikaisesti (Schönach, 2008; Alho, 1949).

Sekä puutervaa että kivihiilitervaa ja näiden johdannaisia on käytetty antimikrobisten ominaisuuksien takia, paitsi puun ja muiden rakennusmateriaalien suojauksessa, mutta myös lääketieteellisissä sovellutuksissa. Erityisesti 1800-luvun lopulla kivihiilitervasta

valmistettujen tuotteiden käyttö oli yleistä mm. haavojen, palovammojen ja korvatulehdusten hoidossa. Suomessa vuoden 1947 tavarasanakirjassa puutervasta tislamalla saatavaksi kreosoottioljyn käyttötarkoitukseksi mainitaan keuhkokatarrin (etenkin *haisevamärkäisten*) hoito (Stigell ym. 1947). Antimikrobiseen tarkoitukseen on maailmalla käytetty myös erilaisia fossiilista alkuperää olevia luonnonasfaltteja ja pikiä, vanhimmat maininnat näistä ovat Assyriasta 1000-luvulta eaa. Kivihiilitervavalmisteiden käytöstä lääkinnässä on EU:ssa luovuttu niiden karsinogeenisten ominaisuuksien vuoksi ihmiselle vähemmän haitallisten anti-septisten ja desinfioivien aineiden ja varsinaisten antibioottien kehittämisen myötä (Ambrose, 2018).

Kivihiilitervaa on käytetty ja käytetään edelleen laajasti kemianteollisuuden raaka-aineena. Kivihiilitervasta opittiin valmistamaan erilaisia tuotteita kemianteollisuuden jalostusprosessien kehittyessä 1800-luvun loppupuoliskolla. Arvokkaita tuotteita olivat mm. väriaineet kuten fuksiini, aniliinisini, metyleenisini ja keinotekoinen indigo; lääkeaineet kuten aspiriini; makeutusaineet kuten sakariini; esimerkiksi hajuvesissä käytettävät tuoksuva aineet kuten keinotekoinen myski ja räjähdäaineet kuten trotyyli (Stigell ym. 1947). Vuonna 1879 kirjoitettiin Suomen Kuvalehdessä kivihiilen merkityksestä seuraavasti: *”Jos itse kivihiilet ovat nykyisen teollisuuden pääponsi ja elinehto, niin onpa tuo pahanhajuinen kivihiiliterwakin ihmeellistä tawaraa, siitä kun on opittu valmistamaan karbolihappoa, asfalttia (maapihkaa), mitä loistawimpia väriaineita ja, ihmeitten ihme, mainioita öljyjä ja hajuvesiä! Uskoisitko tuota? Voi siis otaksua, että missä kivihiiltä on, siellä on rikkautta”*. (N.N. 1879 b). Kivihiiliterva säilyi lukuisten kemikaalien valmistusprosessien yleisimpänä ja edullisimpana raaka-aineena pitkälle 1900-luvun puolelle, ja se oli toiseen maailmansotaan saakka kemianteollisuuden ainoa aromaattisten hiilivetyjen lähde. Koksauksen sivutuotteena syntyvä ammoniakki on ollut erityisesti lannoite- ja räjähdeteollisuudelle tärkeä raaka-aine.

Suomessa ei ole omia kivihiilivarantoja, joten kivihiili on ollut tuontitavaraa. Esimerkiksi vuonna 1899 Suomeen tuotiin kivihiiltä ja koksia noin 250 000 tonnia, pääosin Iso-Britanniasta. Myös kivihiilitervaa on tuotu Suomeen, mutta sitä on myös saatu kotimaisen kaasunvalmistuksen ja koksauksen sivutuotteena, vrt. edellä. Vuonna 1899 kivihiilitervaa tuotiin Suomeen noin 3,6 miljoonaa litraa, pääosin Iso-Britanniasta ja vähäisemmässä määrin Saksasta. *Pikeä ja pikiöljyä* (puuterva- tai kivihiilipikeä ja kreosoottioljyä) tuotiin samana vuonna maahan 73 000 litraa, lähinnä Venäjältä. *Asfalttihuopaa* ja *tervattua vuoraushuopaa* tuotiin yhteensä noin 100 000 kg, pääosin Venäjältä ja Saksasta. Myös vienti oli merkittävää, esimerkiksi asfalttihuopaa vietiin kyseisenä vuonna Ruotsiin huomattavan paljon (920 000 kg), samoin pikeä, jota vietiin lähinnä Ruotsiin ja Saksaan (340 000 litraa). (Tullilaitos, 1900)

Kivihiiliterva ja -piki ovat edelleen kohtalaisen merkittäviä kemian- ja muun teollisuuden raaka-aineita. Vuonna 2004 kivihiilipien käyttömäärä oli EU:ssa noin 500 000 tonnia vuodessa. Pikeä valmistettiin, tuotiin ja vietiin EU:sta. Suurin osa käytöstä tapahtui anodi- ja elektroditeollisuudessa. Pienempiä määriä käytettiin mm. tienrakennuksessa, kattoteollisuudessa ja savikiekkujen valmistuksessa (REACH, 2008). Vuonna 2017 kivihiilitervaa tuotettiin EU:ssa 1,4 miljoonaa tonnia ja tuontimäärä EU:n alueelle oli samana vuonna 370 000 tonnia. Suomessa SSAB:n Raahen terästehdas tuotti vuonna 2017 900 tonnia kivihiilitervaa (Stompel, 2018).

1.1.2 PAH-yhdistepitoiset rakennusmateriaalit ja esiintyminen suomalaisessa rakennuskannassa

Suomessa kivihiilitervapohjaisia aineita on käytetty rakentamisessa 1800-luvun lopulta 1960-luvulle. Taulukossa 2 on esitetty esimerkkejä haitta-ainetutkimuksissa todetuista rakennustuotteista, joissa on voitu käyttää PAH-yhdistepitoisia aineita. PAH-yhdistepitoiset materiaalit voivat olla rakennuksissa peräisin alkuperäisestä rakentamisvaiheesta tai ennen 1970-lukua tehdyistä (perus)korjauksista.

Taulukko 2. Esimerkkejä rakennustuotteista, joissa on Suomessa voitu käyttää kivihiilitervapohjaisia aineita, ja materiaalien käyttötarkoituksia.

Tuote	Käyttötarkoitus
Sivelemällä suojakäsitelty puu	Massiivitiilirunkoisissa rakennuksissa puuväli- pohjien palkkien päissä
	Puisissa ulkorakenteissa
	Lankkulattioissa kosteusrasitetuissa tiloissa
Painekyllästetty puu	Puhelinpylväät, ratapölkkyt, näistä kierrätetyt pi- harakenteet
Mustat, piellä tai tervalla kyllästetyt rakennus- pahvit	Ulkovaipparakenteissa ilmansulkuna (ulkoseinät, yläpohjat)
	Putkieristeiden päällysteinä, yleensä maanvas- taisissa tunneli- tai alapohjatiloissa
Mustat, piellä tai tervalla kyllästetyt rakennus- paperit	Ulkovaipparakenteissa höyryn- ja ilmansulkuna, kevyissä väliseinissä
Mustat, piellä tai tervalla kyllästetyt huovat (kermit)	Märkätilojen lattioissa, usein pintabetonilaatan alla vedeneristeenä
	Vesikatteena
	Vesikatteen (pelti, tiili) aluskatteena
	Maanvastaisissa seinissä
Puuväli- ja alapohjissa palkkien päiden suojana	
Piellä sidostettu korkkilevy, korkkilevyn kiinnityksessä käytetty pikiliima	Perusmuurien, ulkoseinien ja yläpohjien eris- teenä (harvinainen)
Pikiliima	Ns. puupölkkylattioiden ja parkettien, muiden lattianpäällysteiden, korkki- ym. eristelevyjen kiinnitys, yleensä betonialustaan
Pikimaali	Peltikattojen maalina
Pikisivelyt	Maanvastaisten betonirakenteiden (alapohjat, kellarinseinät, putkikanaalit jne.) sisäpinnassa vedeneristeenä
	Tiilimuurausten sisällä pysty- ja vaakasuuntais- ina kerroksina kapillaarikatkona
	Kylmien tilojen päällä olevien välipohjarakentei- den betoni- tai tiilirakenteiden yläpinnoilla
	Märkätilojen lattioissa ja seinissä ylösnostoina
Rintamamiestalojen betonirakenteisen pohjaker- roksen valun yläpinnassa kosteuseristeenä	
Valuasfaltti	Kosteiden tilojen ja porrashuoneiden lattianpin- noitteena
	Kellarien maanvastaisten alapohjien lattioiden materiaalina, maata tai tiililadelmaa vasten, sekä toisinaan nostettuna seinille
	Märkätilojen lattioiden vedeneristeenä
Tervatut tai pietyt orgaaniset eristeet	Sähkökaapeli- ja putkieristeiden kyllästeenä lyijyput- kien sisällä (ns. Bergmanin putket)
	Paperi- ja lankapunosten kyllästeenä sähkökaa- pelieristeissä
	Ikkunaliittymiä tiivistävien riveiden kyllästeenä

Esimerkiksi ulkomuseorakennuksissa on yleisesti käytetty PAH-yhdistepitoisia tuotteita konservointiaineina (Sinisalo ym., 2023). Käytössä olevissa rakennuksissa suurin osa PAH-yhdistepitoisista materiaaleista on yleensä pintarakenteiden alla ja niiden toteaminen edellyttää rakenteiden avaamista. Pääosaa taulukossa mainituista materiaalityypeistä on valmistettu myös bitumipohjaisena, jolloin materiaalin PAH-yhdistepitoisuus on pieni, ks. kohta 1.1.5 Bitumipohjaisten rakennusmateriaalien PAH-yhdistekoostumus.

Esimerkkejä historiallisista rakennustuotteista

Kivihiilitervapohjaisia rakennusmateriaaleja valmistettiin ja markkinoitiin Suomessa jo 1800-luvun puolella. Tuotteita esiteltiin ja mainostettiin mm. lehdissä sekä erillisissä hintaluetteloidissa ja mainoksissa. 1900-luvun puoliväliin mennessä oli kehitelty lukuisia erilaisia kivihiilitervan jatkojalostustuotteiden, bitumin ja erilaisten öljyjen, hartsien ym. materiaalien seoksia, joilla rakennustuotteisiin tavoiteltiin optimaalisia ominaisuuksia. Tuotteita patentoitiin ja kilpailu valmistajien välillä oli kiivasta. Tuotekehitystä ja markkinointia rajoittavaa standardointia tai spesifiä lainsäädäntöä ei vielä ollut. Seuraavassa on esitelty otteita aihepiirin vanhoista julkaisuista.

Rakentamisen materiaaliesitteessä vuodelta 1892 mainostetaan useita kivihiilitervapohjaisia rakennusaineita. Esimerkiksi *patentoidun pärekattoöljyn* esitellään olevan luonteeltaan *antiseptillistä*, ja suojaavan öljyllä kauttaaltaan siveltä pärekattoa laholta, sieni- ym. kasvu- toilta, sekä myös tulelta, ja parantavan katon ilman- ja vedenpitävyyttä. Pärekattoöljyä suositellaan käytettäväksi myös muurattujen pintojen, kuten kalkilla rapattujen kivijalkojen, savutorvien jne. sekä ovien, aitojen ym. voitelemiseen ja kirkonkattojen suojelemiseen. Öljy on ohjeistettu levitettäväksi sellaisenaan sekoitettuna, ja sen kerrotaan kovettuvan mustaksi, lasimaiseksi kerrokseksi päreiden pintaan, kyllästyttään puun solut ja tiivistään kaikki halkeamat ja raot. Samassa julkaisussa on kuvattu toisen tuotteen, *kattohuopaöljyn*, imeytyvän hyvin huopaan ja muodostavan kuivuessaan kovan, lasimaisen kuoren, joka estää imeyttämisaineen haihtumista, tekee pinnasta vedenpitävän ja suojaa huopaa kosteudelta, pitäen huovan kuitenkin notkeana ja vahvana. Tuotteen kerrotaan olevan ominaisuuksiltaan aiempia tuotteita, kuten *asfalttilakkaa*, parempi mm. imeytyvyysominaisuuksien osalta. Lasimaisen pinnan kuvataan olevan myös hyvin tulenkestävä. Myös puun säilyttämiseen tarkoitettuja tuotteita, *kreosoti- ja karboliöljyjä*, esitellään samassa julkaisussa. Näiden käyttöä suositellaan mm. kaikenlaisille puuesineille uudisrakennuksiin, perustuksien korjauksiin, hirsikerroksiin ... portaitten, aitojen ja muurien rakennusaineisiin. (Gernandt, 1892)

Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö selostaa palveluitaan esitteessään vuodelta 1897 seuraavasti: *"Kivihiilitervaa tislataan, valmistetaan keinoitekoista asfalttia, asfaltti-kattohuopaa ja vuorauspahvia., asfalttilakkaa ja kattolevyvernissaa, kreosoottiöljyä, kreosoottitervaa, carboli-neumia. Asfalttitöitä toimitetaan, niink. lattian silaamista huoneissa, käytävissä, portaissa, kellareissa, läävissä ja talleissa; mejereissä, tehtaissa; katuvieruksia, pihoja, etukatoksia ja balkongeja, laakeita kattoja y.m. peitetään asfaltilla; perusmuureja eristetään maakosteudesta ja kaasusta – Erytisala: maakosteuden poissalpoaminen kellareista, jotka ovat vedenpintaa alempana. ... Haitallinen naftaliini-aine poistetaan huolellisesti kaikista teoksista ja siitä tehdään naftaliinikalkkia, joka on tehokkainta ja huokeahintaisinta rutonkuoletusai- netta. Naftaliinin kiteytyminen eli uloshikoileminen on pääsyy siihen, että asfalttiteokset pi- laantuvat, varsinkin kattohuopa ja katonvoide, josta tämä aine ei ole tyystiin poistettu".* (Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö, 1897, kuva 3)

HELSINGIN ASFALTTI-OSAKEYHTIO

HELSINGISSÄ

Konttori: Ruoholahden katu N:o 26.
Tehdas ja Varasto: Ruoholahden rannalla Ruoholahden kadun päässä.

Suurin ulkomaan raaka-aineitten tuonti;

esim. luonnollista asfalttia Travers'ista, Limmer'ista, Vorwohlest, Sisiliasta ja Trinad'ista sekä 1:a Englannin kivihiilitervaa.

Asfalttitöitä toimitetaan, niink. lattian silaamista huoneissa, käytävissä, portaissa, kellareissa, läävissä ja talleissa; moijereissa, tehtaissa: katuvieruksia, pihvoja, etukotkia ja balkongeja, laakeita kattoja y. m. peitetään asfaltilla; perusmuureja eristetään maakosteudesta ja kaasuisista — Erityisala: veden poissalpoaminen kellareista, jotka ovat vedenpintaa alempana.

Monivuotinen kokemus, hyvin harjaantuneet työntekijät sekä parhaimpien raaka-aineitten käyttäminen ovat takauksena kaikin puolin kelloisesta työstä.

Kivihiilitervaa tielataan valmistetaan keino- tekoista Asfalttia, Asfaltti-kattohuopaa ja Vuorauspahvia. Asfalttilakkaa ja Kattolevyvernissaa, Kreosootiöljyä, Kreosootitervaa, Carbolineum.

HUOM! Tehtaassa on täydellinen koneisto usinta lajia. Haitallinen Naftaliini-aine poistetaan huolellisesti kaikista teoksista ja siitä tehdään Naftaliinikalkkia, joka on mitä tehokkainta ja huokeahintaisinta rutonkuoletusainetta.

Naftaliinin kiteytyminen eli uloshikoileminen on pääsyy siihen, että asfaltiteokset pilaantuvat, varsinkin kattohuopa ja katonvoide joista tämä aine ei ole tyystiin poistettu.



Naftaliinista vapaata

Asfalttikattohuopaa

N:o 1.



Kuva 3. Naftaliinista vapaan asfalttikattohuovan mainos 1800-luvun lopulta. Lähde: Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö, 1897.

Viisi vuotta myöhemmin julkaistussa esitteessään sama yhtiö puolustaa kiivaasti omia tuotteitaan muita paremmiksi, koska niistä on tislattu pois naftaleeni ym. kevyet hiilivedyt: "Asfalttilakaksi on nimitettävä ainoastaan sitä tuotetta, joka saadaan kivihiilitervasta, sitten kun keveät haihtuvat öljyt, naftaliini ja vesi ovat siitä tislamalla poistetut". Tuotetta verrataan

kilpailevaan Prima asfalttilakkaan, jonka kerrotaan olevan *"halpaa ulkomaista kaasutervaa, joka sisältää keveitä öljyjä, naftaliinia ja vettä sangen suuressa määrässä"*. Todistuksena oman tuotteensa hyvistä ominaisuuksista on esitetty Tukholman kuninkaallisen Teknillisen opiston aineenkoestuslaitoksen todistus kahdeksan eri asfalttikattopahvin tutkimuksista. Samassa esitteessä kerrotaan tuotekilpailun lisääntyneen. (Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö, 1902)

Edellä mainitussa esitteessä vuodelta 1902 todetaan myös, että asfaltin edullisuus hygieenisissä (terveyttä edistävissä) tarkoituksissa sementtiin verrattuna on alettu tunnustaa. Lehtisessä kuvataan, että *keinotekoinen asfaltti on "pien kaltainen jäännös, joka kivihiilitervaa tislattaessa jää jäljelle sitten kun naftaliini, keveät ja raskaat tervaöljyt ovat poistislattut. Kun piki, joka muuttuu kiinteäksi, sitten uudelleen liuotetaan raskaaksi öljyksi, saadaan tavallista yksinkertaista kivihiilitervaa arvokkaampi tuote"*, jota käytetään kattohuopien kyllästämässä ja asfalttilakkana. Liuotusaineena kerrotaan käytettävän tarkemmin määrittelemättömä raskasta, haihtumatonta öljyä. Tavallisen kivihiilitervan kuvataan olevan huopien kylästämässä huonaa sen sisältämien herkästi haihtuvien komponenttien takia, jotka haihtuessaan haurastuttavat materiaalia. *Asfalttihuopien* kerrotaan yleistyneen kestävyytensä, edullisuutensa ja helpon asennuksensa takia. Lehtisessä ohjeistetaan seikkaperäisesti kolmiorimahuopakaton asennus ja ohjeistetaan voitelemaan katto uudelleen aina 4 tai 5 vuoden välein. *Asfalteeratun vuoraushuovan* kerrotaan olevan samoin kyllästetty kuin kattohuopa, ja soveltuvan asuinhuoneiden lattioiden, seinien ja välikattojen vuoraukseen. Asfalttihuovalla vuorauksen kerrotaan vähentävän kosteuden kertymistä sisäilmaan ja rakenteisiin. (Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö, 1902)

Niin ikään edellä mainitussa esitteessä kerrotaan, että asfaltti *"antaa suojaa esiintunkevaa pohjavettä vastaan ja osaksi se estää likaveden tunkeutumista asuntojen permantoihin ja välikattoihin esim. kylpyhuoneissa, pesutuvissa, makeissa ym"*. Asfaltin kerrotaan olevan yleisissä laitoksissa kuten kouluissa, kasarmeissa, sairashuoneissa, vankiloissa ym. hyvin arvokas lattiamateriaali, joka on melkein kulumaton; *"se ei myöskään kokoa eikä ime itseensä mitään terveydelle vahingollista likaa"*. (Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö, 1902)

Alapohjarakenteissa asfalteerauksen on *"myös tarkoitus estää kaupungeissa aina hyvin suuressa määrin lialla saastutettua pohjavettä, kosteutta sekä myrkyllisiä maakaasuja pääsemästä kellareihin, asuntoihin ja muihin ihmisten olopaikkoihin"*. Kosteuseristys esitetään paitsi terveydellisesti tärkeänä, myös taloudellisesti kannattavana, sillä eristyksellä vähennetään kapillaarisesti kostuvien rakenteiden kuivattamisen edellyttämä suuri polttopuun tarve. Asfaltit esitetään myös paloteknisesti turvallisina ratkaisuina pelkkiin puurakenteisiin verrattuna: *"... vintinlattian laskeminen asfaltilla ... valkeanvaaran syttyessä vintillä, se ei pääse leviämään rakennuksen sisustaan, joka sen lisäksi suojellaan niiden vesivirtojen turmelevalta vaikutukselta, joita silloin vinttiin ajetaan ja jotka useakerroksisia rakennuksia paljon suuremmassa määrin vahingoittavat kuin ylisillä irtipäässyt valkea"*. (Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö, 1902)

Sodan jälkeen julkaistussa Rakennusaineoppi -kirjassa (Kekkonen, 1946) on kuvattu bitumin alkuperä (maaöljyn tislauksessa syntyvä tuote) ja sen ominaisuuksia ja käyttöä mm. tienpäällysteiden ja kattohuopien valmistuksessa. Kivihiilitervan osalta kerrotaan, että *"raakaa kivihiilitervaa ei enää käytetä rakennusteollisuudessa, eikä myöskään tislattua tervaa, jota saadaan tislamalla vesi ja keveät tervaöljyt pois"*. Käytössä on sitä vastoin *"preparoitua tervaa, joka on pikeä, joka sitten käsitellään korkeissa kuumuusasteissa kiehuvilla tervaöljyillä"*. Kirjassa kerrotaan, että sekoittamalla bitumia ja kivihiilitervaa keskenään *"pyritään yhdistämään kumpaisenkin hyviä ominaisuuksia, nimittäin tervan parempi kyky tunkeutua helposti kiviainesseksiin bitumin parempaan kestävyteen, etenkin lämmönvaikutuksissa"*. Esimerkiksi *tervagoudronia* (kivihiiliterva, ransk. goudron de houille) saatiin lisäämällä bitumia kivihiili- tai ruskohiilitervaan ja mahdollisesti erilaisiin pikiaineisiin. Goudronia käytettiin

asfaltointiin, kattohuopien valmistukseen, muuripintojen, raudan ja puun siveelyyn. Puuter-
vasta oppikirjassa kerrotaan, että siitä saadaan tislamalla öljyä (jota kutsutaan kreosoo-
tiksi) sekä pikeä, ”joka ennen kivihilitervan käytäntöön tuloa oli rakennustöiden tärkeä ti-
ivistys- ja eristysaine”. (Kekkonen, 1946)

Edellä mainitussa oppikirjassa terva- ja bitumihuopia kerrotaan käytetyn jo pitkän aikaa kat-
topeitteinä ja eristysaineina permanto- ja seinäpinnoissa. Terva- ja bitumihuopien kyllästys-
aineena kerrotaan käytettävän *preparoitua kivihilitervaa, goudronia tai bitumia*. Vuoraus-
huopien kyllästysaineena käytetään kivihilitervaa. Lisäksi kerrotaan uudemmissa eristysval-
misteista, joissa asfalttihuopakerroksen väliin on sovitettu rautalankaverkkoa tai ohueksi
valssattua lyijylevyä, ja mainitaan *kivihilitervapiestä ja korkkijauheesta valmistetut kork-
kiasfalttilevyt* kosteutta, ääntä ja lämpöä eristävinä levyinä. Muita bitumi- ja tervapitoisia
kirjassa esiteltyjä rakennusaineita ovat mm. *puusementti*, joka on keinotekoisesti rikitettyä
kivihilitervapikeä, johon on sekoitettu pihkaöljyä ja kolofonia; *asfalttiliimat*, jotka on val-
mistettu kivihilitervapiestä, pihkoista, pihkaöljyistä ja merkelistä, ja joita käytetään liimat-
taessa eristelevyjä pystyseiniin; *meriliima*, joka on asfaltista, öljystä ja kautsukista valmis-
tettu tuote, jota käytetään vedessä oleviin puurakenteisiin sekä *asfaltti- ja tervakitit ja -
lakat*. Oppikirjan mukaan Suomessa ei vielä kirjoittamisen aikaan ollut standardeja maini-
tuille rakennustuotteille, toisin kuin monissa muissa maissa, joissa oli asetettu vaatimuksia
useille bitumin, kivihilitervan ja kattohuopien fyysisille ominaisuuksille ja kestävyydelle.
(Kekkonen, 1946)

Vuoden 1947 Tavarasanakirjassa on niin ikään mainittu useita kivihilitervapohjaisia raken-
nustuotteita. *Kreosoottiöljyksi* nimitetään puu-, kivi- ja ruskohilitervan öljymäistä tislettä,
jonka käyttötarkoitukseksi kerrotaan mm. puun kyllästys ja erilaisten desinfiointiaineiden
valmistus. *Kivihilitervapien* käyttötarkoituksena mainitaan mm. asfalttilakan valmistus. *Ter-
vapaperit* ovat kirjan määritelmän mukaan kivihilitervalla kyllästettyjä, eri vahvuisia kos-
teutta kestäviä papereita, joita käytetään eristysaineena rakennuksissa. (Stigell ym. 1947)

Kivihilitervapohjaisten tuotteiden käytön loppuminen

Kivihilitervapohjaisten tuotteiden käytöstä rakentamisessa ja tienrakentamisessa luovuttiin
Euroopassa 1900-luvun loppupuoliskolla. Suomessa käyttö loppui 1960-luvulla. Esimerkiksi
Saksassa kivihilitervapohjaisia sideaineita käytettiin tienrakennuksessa asfaltin valmistuk-
sessa vielä 1990-luvulle saakka. Kivihiliterva ja -piki on korvattu rakennustuotteissa ja as-
faltin valmistuksessa pitkälti bitumipohjaisilla tuotteilla. Merkittävimpänä poikkeuksena on
kreosoottiöljy, joka on edelleen EU:ssa sallittu ammattikäytössä eräisiin ulkorakenteisiin tar-
koitetun puun lahosuojauksessa. Kreosoottiöljyn sallituista käyttötavoista ja käyttörajoituk-
sista ja tähän liittyvästä lainsäädännöstä on kerrottu tarkemmin Tukesin sivustolla osoit-
teessa: <https://tukes.fi/kemikaalit/biosidit/kreosootin-kayton-rajoitukset>. Kreosoottiöljyn
valmistuksessa prosessia on viime vuosikymmeninä muutettu siten, että öljy sisältää vä-
hemmän syöpövaarallista bentso[a]pyreeniä. Bentso[a]pyreenin sallittu pitoisuus EU:ssa
sallituissa puunkäsittelyyn tarkoitetuissa tuotteissa on <50 mg/kg. (IARC, 2013).

Bitumipohjaiset aineet korvasivat kivihilitervapohjaiset aineet rakentamisessa vähittäin
1900-luvun alkupuoliskolla maaöljyn yleistyessä energian lähteenä ja kemianteollisuuden
raaka-aineena (Pyhälä, 1927). Vuoden 1927 Rakennustaito-lehdessä kerrotaan bitumi- ja
kivihilitervapohjaisilla tuotteilla käsitellyistä rakennuspahveista seuraavaa: ”*Bitumisoimi-
seen käytetään halvemmissa lajeissa paksua kivihilitervaa tai muita tervan kaltaisia aineita.
Tästä syystä on niillä tyypillinen haju, joka usein voi aiheuttaa, että se tuntuu huoneistois-
sakin, missä tällaisia pahveja on käytetty väliseiniin y. m. s. Aivan hajuttomia ovat taas
puhtaalla bitumilla kyllästetyt eristuspahvit, jotka tavallisesti ovat kuviokkaita pinnaltaan ja
asbestijauheella puuteroidut*” (Pyhälä, 1927).

Kuvassa 4 on esitetty esimerkki bitumipohjaisen tuotteen mainonnasta. Kyseessä on Shellin valmistama ja maahantuoma, meksikolaisesta öljystä tislattu Mexphalt-bitumi (kuvat 4 ja 5).

Lukekaapa mitä tunnettu rakennusmestari O. Huovinen sanoo Mexphaltin käytöstä eristysaineena kosteutta vastaan. Ehkäpä siinä on jotakin, mikä voi olla Teille hyödyksi.

TODISTUS:

Pyynnöstänne saan täten kokemuksestani esiintuoda Shell Mexphaltin käytöstä seuraavaa:

Eristäminen Mexphaltilla on helppoa. Astiassa oleva kiinteä Mexphalt kuumennetaan sulaan tilaan, jolloin se juoksevassa muodossa on helposti siveltävissä eristettävälle pinnalle, jonka tulee olla kuiva ja hyvin puhdistettu.

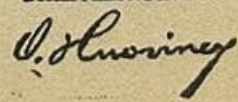
Olen uutisrakennuksissa pohjaveden eristämiseen samoin kuin kellarien seinien ja laipioiden eristykseen käyttänyt Mexphaltia, koska on osoittautunut, ettei se liukene veteen eikä pohjahappoihin, ollen se ehdottomasti vedenpitävää. Kun Mexphalt lisäksi on hajutonta, niin se ei pilaa kellarin ilmaa.

Erilaisia rakennuslevyjä kiinnittäessäni olen huomannut kuumajuoksuisen Mexphaltin olevan erinomaisen tarttumiskykyistä.

Yllämainituissa eristystöissä, sekä ylipäänsä eristettäessä sellaisia paikkoja, jotka eivät ole alttiita korkeammille lämmöille, on Mexphalt E-laatu osoittautunut soveliaaksi. Kattohuovan kiinnittämiseen ulkokattoihin on käytetty puhallettua Mexphalt R. 2-laatua, jonka sitkeys ja korkea sulamispiste ovat tehneet sen erikoisen vastustuskykyiseksi lämpötilan vaihteluita vastaan.

Ylläolevien kokemuksieni perusteella voin mitä parhaiten kaikkialla rakennuksilla, missä yleensä tämänlaatuinen eristys tulee kysymykseen, erittäin tehokkaana mutta samalla halpana eristysaineena suositella käytettäväksi Shell Mexphaltia, jota yksinomaan olen käyttänyt tällaisiin tarkoituksiin.

Kotka, 2 p:nä joulukuuta 1937.

Kunnioitteen
O. Huovinen
 Rakennusliike


Kuva 4. Esimerkki 1900-luvun alkupuolen bitumipohjaisesta vedeneristystuotteesta. Kuvassa ote Shell Oy:n valmistaman Mexphalt-eristeen mainoksesta vuodelta 1937 (Shell, 1937).

Asennusohjeessa vuodelta 1938 tuotevalmistaja suosittelee eristystuotettaan moniin tarkoituksiin seuraavasti: "Mexphalt on mainiota. Muutamia esimerkkejä: kylmähuoneisiin, pohjaeristykseen kosteutta vastaan, betonipintojen eristämiseen, putkien ja vesisäiliöitten suojaamiseen, seinälevyjen kiinnittämiseen, kattojen suojaamiseen, proomujen tiivistämiseen jne.". Ohjeessa mainitaan, että tuote on hajutonta, eikä pilaa kellarin ilmaa (kuva 5). Tämän raportin kirjoittajien kokemusten perusteella esimerkiksi Suomessa käytetyissä korkkieristeissä käytetyt sideaineet ja levyjen kiinnitysaineet ovat olleet pääosin bitumipohjaisia.

Kivihiilitervapohjaisia materiaaleja sisältävät, korkeampia PAH-yhdistepitoisuuksia omaavat korkkieristeet ovat harvinaisempia, mutta näitäkin on valmistettu.



Kuva 5. Ote Shell Oy:n asennusohjeesta Mexphalt jäähdytyshuoneiden eristämiseen (SHELL, 1938).

1.1.3 Rakennusmateriaaleja koskeva lainsäädäntö

PAH-yhdistepitoisia rakennusmateriaaleja koskevaa lainsäädäntöä on käsitelty kattavasti Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen julkaisussa *Kivihiilitervatuotteet asuinrakennuksissa* (Aira-Rakinen ym. 2023). Kivihiilitervapohjaisten tuotteiden valmistusta, myyntiä tai käyttöä ei

säädely erikseen Suomessa 1900-luvun alkupuoliskolla. Suomen ensimmäisessä Rakennusmääräyksessä ja -asetuksessa 1950-luvun lopulta säädettiin yleisellä tasolla rakennusten terveellisyydestä, ja että rakennus on tehtävä terveydelle vaarattomista aineista (Rakennuslaki 370/1958 ja Rakennusasetus (266/1959). 1960-luvun lopulla säädetyissä Myrkkylaisissa ja -asetuksessa kreosootti määriteltiin puutavaransuojausmyrkyksi (Myrkkylaki 309/1969 ja Myrkkylaki 612/1969). Vuonna 1990 kreosootin luokitus muutettiin lievästi myrkyllisestä myrkylliseksi puutavaransuojausmyrkyksi, luokituksen muutos johtui korkeista PAH-pitoisuuksista. 1980-luvun lopulla säädetyssä Kemikaalilaisissa säädettiin tarkemmin suoja-aineiden hyväksymismenettelyistä (Kemikaalilaki 744/1989). Valtioneuvoston päätös kreosootin ja sillä käsitellyn puun käytön sekä markkinoille luovuttamisen rajoittamisesta tuli voimaan vuonna 1996 (Vnp 1405/1995). Asetus koski paitsi kreosoottia, myös muita asetuksessa määriteltyjä samankaltaisia tuotteita. Päätöksellä kiellettiin kivihiilitervapohjaisten tuotteiden ja niillä käsitellyn materiaalin luovuttaminen kuluttajakäyttöön. Nykyään kivihiilitervapohjaisten tuotteiden myynti ja käyttö puunsuoja-aineena edellyttää EU:n biosidiasetuksen 528/2012 mukaisen luvan (EU, 2012). EU:n REACH-asetus 1907/2006 kieltää pitoisuusrajat ylittävien syöpävaarallisten seosten luovuttamisen kuluttajakäyttöön. Kreosoottiöljyn käyttö on rajattu biosidien lupapäätöksillä ainoastaan ratapölkkyjen ja pylväiden käsittelyyn (EC, 2010).

Suomessa ei ole tilastoitu kuluttajien käyttämien kivihiilitervapohjaisten rakennustuotteiden määriä asuinrakennuksissa eikä sitä, mistä suomalaikuluttajat ovat hankkineet materiaaleja (Airaksinen ym. 2023).

1.1.4 Kivihiilitervapohjaisten rakennusmateriaalien PAH-yhdistekoostumus

Kivihiiliterva koostuu polysyklisistä aromaattisista hiilivedyistä, muista hiilivedyistä, fenoleista sekä heterosyklisistä happi-, rikki- ja typpipitoisista yhdisteistä. PAH-yhdisteet muodostavat kivihiilitervapohjaisten aineiden koostumuksesta kymmeniä painoprosentteja, piessä jopa 90 % (EPA, 1978; IARC, 2010). Kivihiilitervapohjaisissa materiaaleissa voi olla myös öljyhiilivetyjä.

PAH-yhdisteet ovat puoli haihtuvia (SVOC) tai haihtumattomia orgaanisia yhdisteitä. Yksinkertaisin PAH-yhdisteistä on kaksi aromaattista rengasta sisältävä naftaleeni (C₁₀H₈).

Bitumipohjaiset tuotteet sisältävät kivihiilitervapohjaisia tuotteita huomattavasti vähemmän PAH-yhdisteitä. Ks. myös kohta 1.1.5.

Kivihiilitervapohjaisten materiaalien ominaisuudet ja PAH-yhdistekirjo vaihtelevat tuotantoprosessista (lähinnä tislauslämpötiloista) riippuen, sekä vähäisemmässä määrin lähtömateriaalina käytetyn kivihiilen ominaisuuksien mukaan. Kivihiilen koostumus vaihtelee hiilen alkuperän mukaan. Kivihiilitervan PAH-yhdistepitoisuus on sitä suurempi, mitä korkeammassa lämpötilassa tislaus on tehty (NTP, 2021). Materiaalin PAH-yhdistekoostumus vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin. Lähtökohtaisesti öljymäisissä tuotteissa on molekyyli painoltaan pienempiä yhdisteitä ja pikimäisissä tuotteissa runsaasti molekyyli painoltaan suuria yhdisteitä (Stout ym. 2001).

Kreosoottiöljy on kivihiilitervan tislauksessa syntyvien kaasujen kondensaatti. Kreosoottiöljyn koostumus vaihtelee tuotantoprosessista riippuen, ja koostuu aromaattisista hiilivedyistä ja niiden johdannaisista (mm. asenafteni, fluoranteeni, fluoreeni, fenantreeni, naftaleenit, dibentsofuraani, antraseeni, bentso[a]pyreeni)), tervahapoista (fenolista, kresoleista ja ksylenoleista) ja tervaemäksistä (esim. pyridiinijohdannaiset). Kreosoottiöljystä jopa 75 % on PAH-yhdisteitä. Kreosootissa (vai kreosoottiöljyssä) on aiemmin saattanut olla bentso[a]pyreeniä jopa muutamia tuhansia mg/kg. (IARC, 1985)

Kirjallisuudessa kivihiilitervapohjaisista materiaaleista on analysoitu ja listattu tyypillisesti kymmeniä erilaisia PAH-yhdisteitä. Raportoitujen yhdisteiden määrää rajoittaa yleensä se, kuinka kattavasti yhdisteitä on pyritty tunnistamaan. Kivihiilitervapohjaisista aineista on tunnistettu kaiken kaikkiaan noin 400 erilaista PAH-yhdistettä, mutta on arvioitu, että yhdisteitä olisi todellisuudessa jopa 10 000 (ECHA, 2018a).

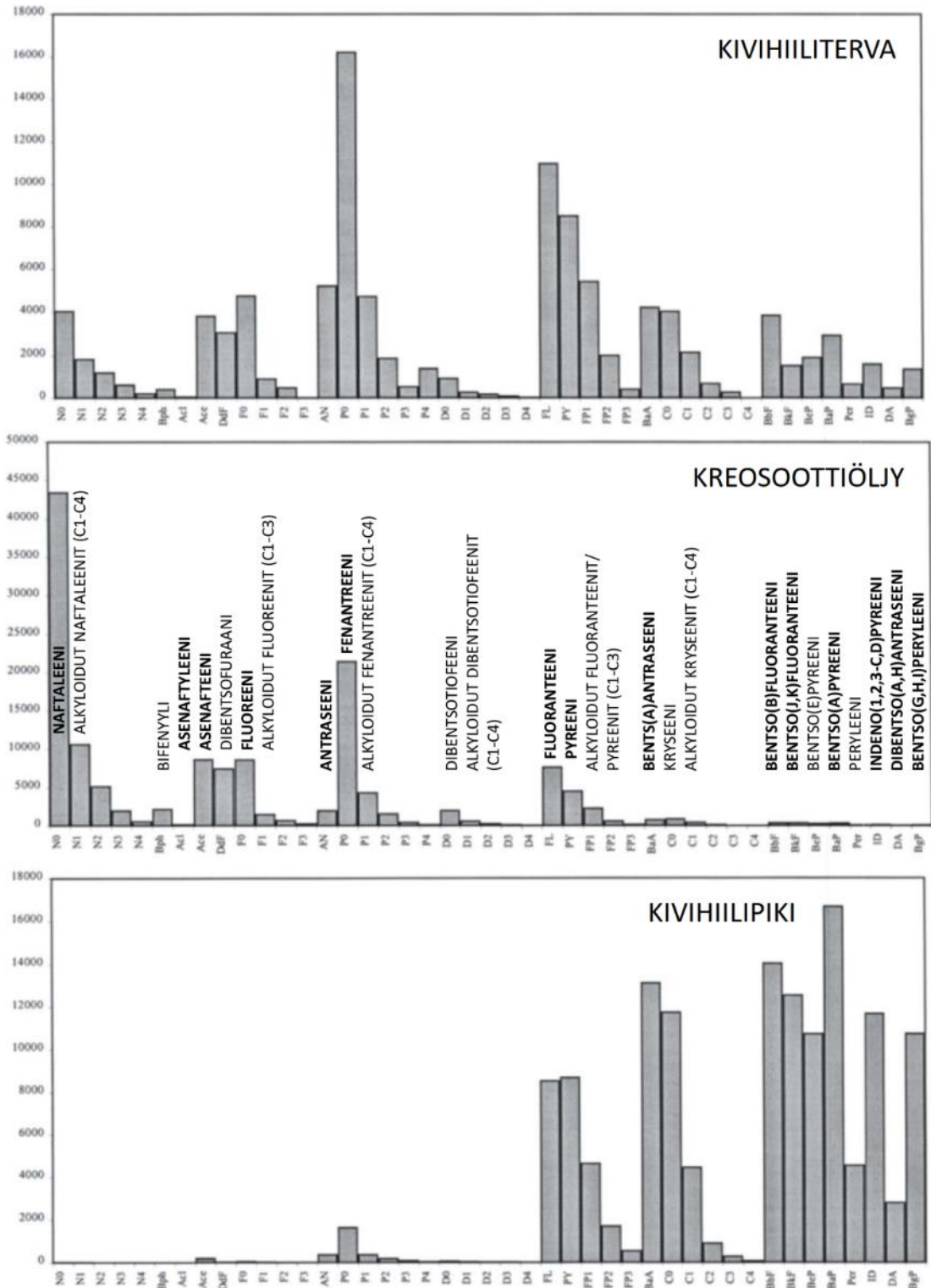
Yhdysvaltain ympäristönsuojeluministeriö on listannut 1980-luvulla kuusitoista ensisijaista PAH-yhdistettä ns. PAH(16)-listaksi (EPA, 1986). Yhdisteet on valittu niiden ympäristö- ja terveysvaikutusten näkökulmasta. PAH(16)-yhdisteet ja niiden ominaisuuksia on listattu taulukossa 3.

Taulukko 3. EPA PAH(16)-yhdisteet ja niiden ominaisuuksia. (lähde: WHO, 1998)

Yhdiste	Molekyyli- kaava	Moolimassa (g/mol)	Sulamispiste (°C)	Kiehumispiste (°C)
Naftaleeni	C ₁₀ H ₈	128	81	218
Asenaftyleeni	C ₁₂ H ₈	152	92	280
Asenafteeni	C ₁₂ H ₁₀	154	95	279
Fluoreeni	C ₁₃ H ₁₀	166	115	295
Fenantreeni	C ₁₄ H ₁₀	178	101	340
Antraseeni	C ₁₄ H ₁₀	178	216	342
Fluoranteeni	C ₁₆ H ₁₀	202	109	375
Pyreeni	C ₁₆ H ₁₀	202	150	393
Bentso[a]antraseeni	C ₁₈ H ₁₂	228	161	400
Kryseeni	C ₁₈ H ₁₂	228	253	448
Bentso[b]fluoranteeni	C ₂₀ H ₁₂	252	168	481
Bentso[k]fluoranteeni	C ₂₀ H ₁₂	252	215	480
Bentso[a]pyreeni	C ₂₀ H ₁₂	252	178	496
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	C ₂₂ H ₁₂	276	164	536
Bentso[g,h,i]peryleeni	C ₂₂ H ₁₂	276	278	545
Dibentso[a,h]antraseeni	C ₂₂ H ₁₄	278	267	524

Alle neljä aromaattista rengasta sisältävät PAH(16)-yhdisteet (naftaleeni, asenaftyleeni, asenafteeni, fluoreeni, fenantreeni ja antraseeni; molekyylipaino 128–178 g/mol) voivat esiintyä kaasumaisessa muodossa ilmassa. Neljä aromaattista rengasta sisältävät PAH(16)-yhdisteet (fluoranteeni ja pyreeni; molekyylipaino 202 g/mol) voivat esiintyä sekä kaasufaasissa että hiukkasiin sitoutuneena. Raskaammat PAH(16)-yhdisteet (bentso[a]antraseeni, kryseeni, bentso[b]fluoranteeni, bentso[k]fluoranteeni, bentso[a]pyreeni, indeno[1,2,3-cd]pyreeni, dibentso[a,h]antraseeni, bentso[ghi]peryleeni; molekyylipaino > 228 g/mol) esiintyvät ilmassa vain hiukkasiin sitoutuneina. (IARC, 2010)

PAH(16)-yhdisteet ovat substituioimattomia (sivuketjuttomia) PAH-yhdisteitä. PAH-yhdistepitoisissa rakennustuotteissa on tyypillisesti myös PAH(16)-listan ulkopuolisia PAH-yhdisteitä, esimerkiksi listalla olevien yhdisteiden alkyloituja variantteja. Useita PAH(16)-listaa laajempia analyttilistoja on esitetty eri lähtökohdista (Stout ym. 2001). Nämä sisältävät tyypillisesti PAH(16)-yhdisteiden alkyloituja variantteja. Kuvassa 6 on esitetty esimerkki kivihiilitervapohjaisten materiaalien PAH-yhdistekoostumuksesta pohjoisamerikkalaisesta tutkimuksesta (Stout ym. 2001). Kuvaaajia tarkastellessa tulee huomioida, että kyseessä on yksi esimerkki, ja kirjallisuuden perusteella yksittäisten PAH-yhdisteiden pitoisuudet vaihtelevat suuresti materiaalikohtaisesti (mm. IARC, 1985).



Kuva 6. Esimerkki kreosoottiöljyn, kivihiilitervan ja kivihiilipiien PAH-yhdistekoostumuksesta. Kaikissa kuvaajissa on samat yhdisteet. PAH(16)-listan yhdisteet on lihavoitu. Y-akselin (PAH-yhdistepitoisuus) skaala kivihiilitervalla ja kivihiilipiellä 0–18 000 mg/kg, kreosoottiöljyllä 0–50 000 mg/kg. Kuvaajien lähde: Stout ym. 2001, muokattu lisäämällä suomenkieliset selitetekstit.

1.1.5 Bitumipohjaisten rakennusmateriaalien PAH-yhdistekoostumus

Bitumi on maaöljystä tislaamalla jalostettu puolikiinteä musta tuote, joka pehmenee lämmitettäessä nestemäiseksi.

Bitumeilla on monia samoja ominaisuuksia kuin kivihiilitervapohjaisilla aineilla. Bitumit korvasivat kivihiilitervapohjaiset aineet rakennustuotteissa kokonaisuudessaan 1960-luvun loppuun mennessä. Edellä taulukossa 2 esitetyistä rakennustuotteista valtaosaa onkin valmistettu myös bitumipohjaisena, ks. luku 1.1.2 PAH-yhdistepitoiset rakennusmateriaalit ja esiintyminen suomalaisessa rakennuskannassa. Tästä syystä materiaalin PAH-yhdistepitoisuuden määrittämiseksi tarvitaan laboratorioanalyysiä.

Bitumien koostumukset vaihtelevat, ja riippuvat lähtömateriaalin koostumuksesta ja valmistusprosessista. Bitumeissa on yleisesti pieniä määriä PAH-yhdisteitä, alkyloituja PAH-yhdisteitä ja rikkiä sisältäviä polyaromaattisia yhdisteitä. Pääosin bitumit koostuvat kuitenkin alifaattisista ja aromaattisista hiilivedyistä, rengasrakenteisista alkaaneista ja heterosyklisistä tyyppiä, happea ja rikkiä sisältävistä hiilivedyistä sekä pienistä määristä metalleja. Raakaöljyn PAH-yhdistepitoisuus on noin 1,4 paino-% (14 000 mg/kg) (Stout ym. 2001). Bitumissa ja muissa maaöljystä jalostetuissa tuotteissa PAH-yhdistepitoisuudet ovat pieniä, koska suurin osa 3–7-renkaisista PAH-yhdisteistä poistuu tuotteesta tislauksen aikana, ja toisaalta tislauksen prosessilämpötilat ovat matalahkoja (350–450°C), mistä syystä prosessissa ei synny uusia PAH-yhdisteitä (IARC, 2011). Bitumeissa yksittäisten PAH-yhdisteiden pitoisuudet vaihtelevat yleensä alle yhdestä milligrammasta kilossa muutamaan milligrammaan tai korkeintaan muutamaan kymmeneen milligrammaan kilossa, jolloin PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus vaihtelee muutamista kymmenistä muutamiin satoihin milligrammoin kilossa (IARC, 2011).

Bitumien (*Bitumen*) ja kivihiilipikien (*Coal-tar pitches*) PAH-yhdistepitoisuuksia on vertailtu taulukossa 4.

Taulukko 4. Bitumien ja kivihiilipikien PAH-yhdistepitoisuuksia. (Lähde: IARC, 2011)

PAH	Bitumens (µg/g)	Coal-tar pitches (µg/g)
Phenanthrene	0.32–7.3	19850–25700
Anthracene	0.01–0.32	4600–7310
Fluoranthene	0.1–0.72	29000–36000
Pyrene	0.17–1.5	21300–27200
Chrysene	0.8–3.9	11200–22670
Perylene	0.04–3.9	2770–3500
Benzo[a]anthracene	0.14–1.1	20400–24510
Benzo[k]fluoranthene	ND–2.2	5250–6010
Benzo[a]pyrene	0.22–1.8	11360–15170
Benzo[g,h,i]perylene	1.2–5.7	3430–3530
Anthanthrene	ND–0.11	1231–1728
Dibenzo[a,i]pyrene	ND–0.6	127–164
Coronene	ND–0.4	ND–120

Bitumia esiintyy myös luonnossa, jossa sitä on muodostunut maaöljystä miljoonien vuosien kuluessa kevyiden öljyfraktioiden haihduttua. Merkittäviä esiintymiä on mm. Lähi-idässä ja Amerikan mantereilla. Luonnon bitumia on käytetty kautta aikain eri tarkoituksissa, mm. rakentamisessa laastin sideaineena ja laivanrakennuksessa. Esimerkiksi Raamatun vanhassa testamentissa (1. Moos. 6:14) kerrotaan, että Nooan arkki valmistettiin pihkaisesta puusta

ja tiivistettiin sisältä ja ulkoa *asfalttipeillä eli maapihkalla*, joka on ollut Kuolleen meren alueella ko. aikana yleisesti käytettyä luonnonbitumia.

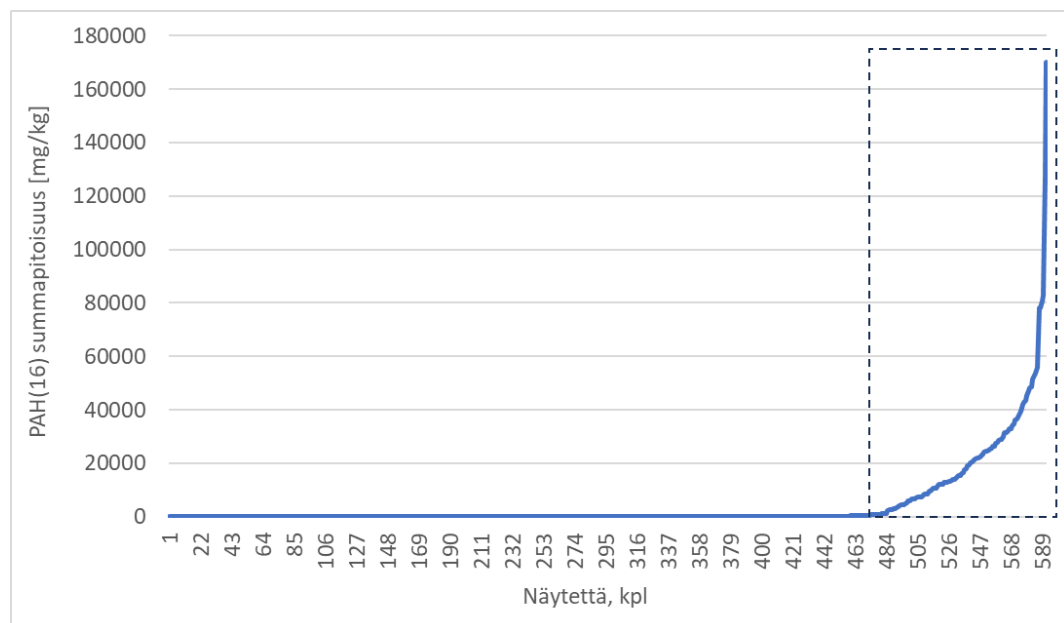
Nykyään noin 80 % EU:ssa käytettävästä bitumista käytetään asfaltin sideaineeksi, loput mm. kattotuotteisiin, vedeneristeisiin, maaleihin ja lattianpinnoitteisiin (IARC, 2013).

1.1.6 PAH-yhdisteet suomalaisissa haitta-ainenäytteissä

Suomalaisista rakennuksista kerätyistä PAH-yhdistepitoisista rakennusmateriaaleista on julkaistu vuonna 2018 artikkeli, jossa on esitetty lähes 600 haitta-ainetutkimuksissa kerätyn, mahdollisesti PAH-yhdistepitoiseksi epäillyn rakennusmateriaalinäytteen PAH(16)-yhdisteiden pitoisuusanalyysien tulokset (Komulainen ym. 2018). Alla on esitetty samaan aineistoon perustuva tarkempi analyysi näytteiden PAH(16)-yhdistepitoisuuksista.

Kuvassa 7 on esitetty PAH(16)-yhdisteiden pitoisuuksien jakautuminen koko aineistossa. Materiaalit jakautuivat kahteen ryhmään: ensimmäisessä ryhmässä, jonka materiaalit ovat selvästi PAH-yhdistepitoisia, PAH(16)-summapitoisuus on suurempi kuin 1 000 mg/kg. Toisessa ryhmässä, ei-PAH-yhdistepitoiset materiaalit, pitoisuus on alle 100 mg/kg (kuva 7). Vain pienessä osassa näytteitä pitoisuus oli välillä 100–1 000 mg/kg. Kirjallisuustietojen perusteella näytteet, joissa PAH(16)-summapitoisuus on alle 100 mg/kg edustavat bitumituotteita (vrt. kohdat 1.1.4 ja 1.1.5). Näytteet, joissa PAH(16)-summapitoisuus on välillä 100–1 000 mg/kg, ovat todennäköisimmin bitumipohjaisia, mutta saattavat sisältää seostettuna pieniä määriä kivihiilitervapohjaisia tuotteita. Näytteet, joissa PAH(16)-summapitoisuus on yli 1 000 mg/kg, sisältävät suurella varmuudella kivihiilitervapohjaisia materiaaleja.

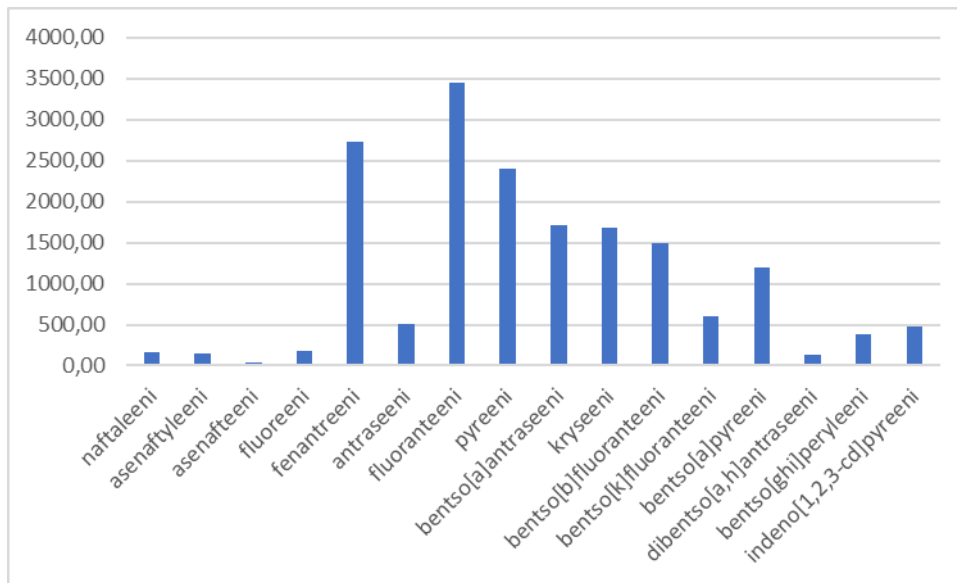
Aineistossa PAH(16)-summapitoisuus 100 mg/kg ylittyi 6 %:ssa kermimäisistä, 51 %:ssa paperimaisista ja 38 %:ssa sivelymäisistä materiaalinäytteistä. Tutkimusaineiston perusteella rakennustuotteista paperi- ja sivelymäiset (pikimäiset) tuotteet olivat selvästi useammin kivihiilitervapohjaisia kuin kermimäiset tuotteet.



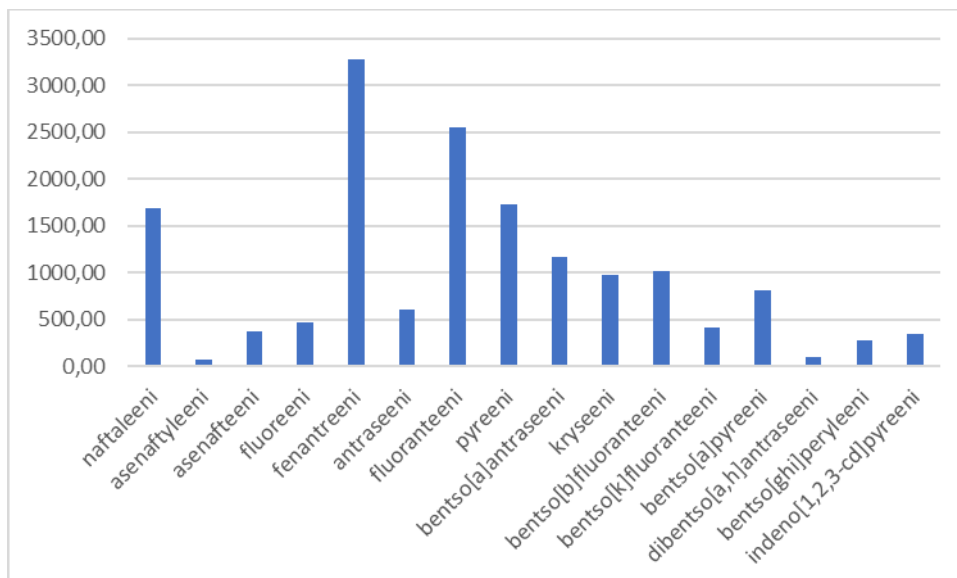
Kuva 7. PAH(16)-summapitoisuuden jakautuminen koko näyteaineistossa. Kuvaajasta on rajattu katkoiviivalla näytteet, joiden PAH(16)-pitoisuus ylitti 1 000 mg/kg (Komulainen ym. 2018).

Kuvissa 8–10 on esitetty näyteaineiston PAH(16)-yhdisteiden yhdistekohtaiset keskiarvopitoisuudet materiaalityypeittäin. Kuvaajiin on sisällytetty näytteet, joiden PAH(16)-

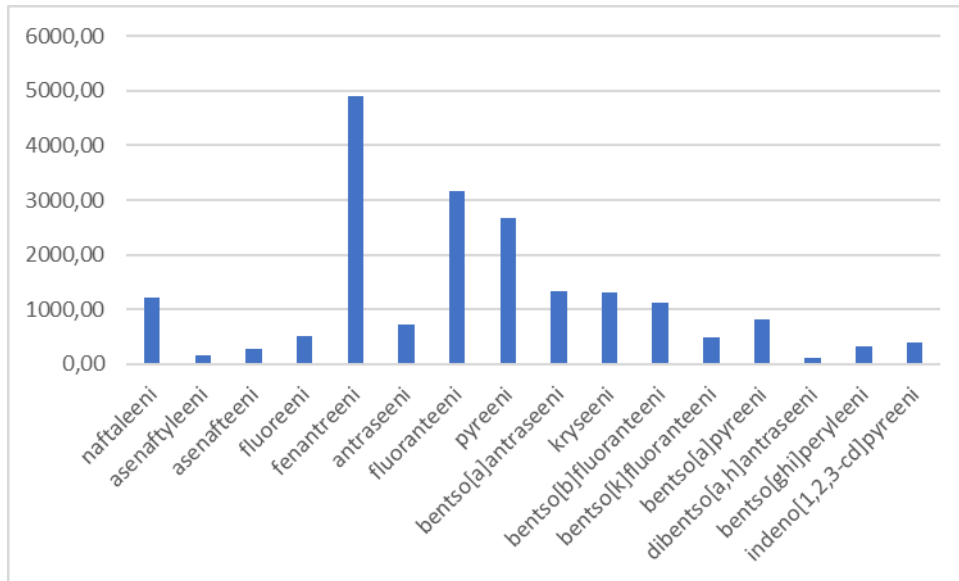
summapitoisuus ylitti 100 mg/kg. Tulosten mukaan paperimaisissa näytteissä (kuva 8) ei esiintynyt kaikkein haihtuvimpia PAH(16)-yhdisteitä juuri lainkaan, vaikka materiaalien PAH(16)-summapitoisuudet olivat kuitenkin korkeita. Sivelymäisissä näytteissä (kuva 9) esiintyi puolestaan korkeita pitoisuuksia myös haihtuvimpia PAH-yhdisteitä. Kermimäisten tuotteiden PAH-yhdistejakauma muistutti sivelyjen jakaumaa, mutta naftaleenin ja muiden haihtuvimpien yhdisteiden suhteellinen pitoisuus on sivelyjä pienempi (kuva 10). Tulosten perusteella yhtenä pääkomponenttina esiintyi fenantreeni – rakennusmateriaalinäytetyypistä riippumatta.



Kuva 8. Paperimaisten rakennusmateriaalinäytteiden yksittäisten PAH(16)-yhdisteiden keskipitoisuudet. PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuuden keskiarvo näytteissä oli 17 000 mg/kg (130–53 000 mg/kg) (Komulainen ym. 2018).



Kuva 9. Sivelymäisten rakennusmateriaalinäytteiden yksittäisten PAH(16)-yhdisteiden keskipitoisuudet. PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuuden keskiarvo näytteissä oli 16 000 mg/kg (110–170 000 mg/kg) (Komulainen ym. 2018).



Kuva 10. Kermimäisten rakennusmateriaalinäytteiden yksittäisten PAH(16)-yhdisteiden keskipitoisuudet. PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuuden keskiarvo näytteissä oli 19 000 mg/kg (120–54 000 mg/kg) (Komulainen ym. 2018).

Kivihiilitervassa ja siitä valmistetuissa tuotteissa fenantreenia on eniten kaikista haihtuvista PAH(16)-listan yhdisteistä. Naftaleenin osuus saattaa olla joissakin tuotteissa yhtä korkea, mutta haihtuvampana se laskee fenantreenia nopeammin. Näin olleen fenantreenin löydös sisäilmassa vahvasti viittaa rakennusmateriaaleissa käytettyihin PAH-yhdisteisiin kun taas naftaleenilla on useampia muitakin lähteitä (esim. liikenteen päästöt, puun ja tupakan poltto jne).

1.2 PAH-yhdisteet sisäilmassa

Alle neljä aromaattista rengasta sisältävät PAH(16)-yhdisteet (naftaleeni, asenaftyleeni, asenafteeni, fluoreeni, fenantreeni ja antraseeni) voivat esiintyä kaasumaisessa muodossa ilmaa. Neljä aromaattista rengasta sisältävät PAH(16)-yhdisteet (fluoranteeni ja pyreeni) voivat esiintyä sekä kaasufaasissa että hiukkasiin sitoutuneena. Raskaammat PAH(16)-yhdisteet (bentso[a]antraseeni, kryseeni, bentso[b]fluoranteeni, bentso[k]fluoranteeni, bentso[a]pyreeni, indeno[1,2,3-cd]pyreeni, dibentso[a,h]antraseeni, bentso[ghi]peryleeni) esiintyvät ilmassa vain hiukkasiin sitoutuneina. (IARC, 2010).

Tavanomaisessa tilanteessa rakennusmateriaaleista peräisin olevat PAH-yhdisteet ovat lähes yksinomaan kaasufaasin yhdisteitä. Raskaampia hiukkasfaasin yhdisteitä, esimerkiksi bentso[a]pyreeniä, esiintyy sisäilmassa vain rakenteita rikottaessa (esimerkiksi PAH-yhdisteitä sisältävän materiaalin purkutyön aikana). Sisäilmasta normaalitilanteessa todetut raskaammat PAH-yhdisteet ovat usein peräisin palamisprosesseista, vrt. esimerkiksi savusauhan ilmasta mitatut pitoisuudet, kohta 1.2.1.

1.2.1 PAH-yhdistepitoisuudet suomalaisten rakennusten sisäilmassa

Työterveyslaitos on julkaissut yhteenvetdon sisäilmanäytteistä analysoitujen PAH-yhdisteiden pitoisuuksista (Wallenius ym. 2023). Tutkitut kohteet olivat pääosin sisäilmanlaadultaan ongelmallisiksi koettuja asuntoja, toimistoja ja tuotannollisia työpaikka. Työterveyslaitoksen aineistossa suurimmasta osasta tutkituista sisäilmanäytteistä löydettiin naftaleenia ja fenantreenia pääkomponentteina. Havaitut pitoisuudet olivat pääosin pieniä. Raportin mukaan näytteistä 95 %:ssa naftaleenipitoisuudet olivat alle 8 µg/m³ ja fenantreenipitoisuudet

alle $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Muiden PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat pienempiä ja niitä todettiin harvemmin. Aineistossa ei oltu tarkasteltu hiukkasfaasissa esiintyvien PAH(16)-yhdisteiden pitoisuuksia (Wallenius ym. 2023).

1.2.2 Rakennusmateriaaliperäiset PAH-yhdisteet sisäilmassa

PAH-yhdistepitoisten materiaalien päästöjä käsittelevät tutkimukset ovat tarkastelleet pääosin tuotannollisia työympäristöjä, joissa PAH-yhdistepitoisia materiaaleja kuumennetaan (esimerkiksi asfalttiteollisuus, tienrakennus, kattotyöt) tai joissa PAH-yhdistepitoiselle materiaalille voi altistua pölyn tai roiskeiden kautta (esimerkiksi rakennusten purkutyöt, puunkyllästämöt). Tarkastelun kohteena ovat tyypillisesti olleet kuumennetusta materiaalista emittoituvat PAH-yhdistepitoiset höyryt (fumes) tai iholle pölynä tai roiskeina päätyvä materiaali. (IARC, 1985) Tiedossa oli vain yksittäisiä tapaustutkimuksia, joissa on mitattu materiaalien PAH-yhdistepäästöjä vanhasta PAH-yhdistepitoisesta rakennusmateriaalista sisäilmaan materiaalin ollessa koskemattomassa tilassa rakenteissa (Honkanen, 2006; Pineiro ym. 2021, Kozicki ja Niesłochowski, 2020). Honkasen ym. tutkimuksessa mitattiin vanhan, toimistoksi peruskorjatun kiinteistön sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksia. Tilojen sisäilmanlaatu oli koettu tunkkaiseksi ja huonoksi. Sisäilmasta mitattu naftaleenipitoisuus oli keskimäärin $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. PAH(16)-summapitoisuutta ei mitattu/raportoitu. PAH-yhdisteiden lähteenä oli uuden lattianpäällysteen alle jätetty vanha PAH-yhdistepitoinen kivihiilipiki (Honkanen ym. 2006). Pineiron ym. tutkimuksessa selvitettiin syytä asunnon sisäilmaongelmille. Asunnossa oli koettu oireita, kuten päänsärkyä, silmien ja ylähengitysteiden ärsytysoireita ja hengenahdistusta. Sisäilmasta mitattu naftaleenipitoisuus oli $16\text{--}48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, fenantreenipitoisuus $1,1\text{--}1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja PAH(16)-summapitoisuus $30\text{--}63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lisäksi sisäilmasta mitattiin $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuus $\text{C}_6\text{--}\text{C}_{12}$ -hiilivetyjä. PAH-yhdisteiden lähteenä oli asunnon yläpuolisen tasakattorakenteen katteena käytetty kivihiilitervapohjainen kermi (Pineiro ym. 2021).

Eräessä puolalaistutkimuksessa (Kozicki ja Niesłochowski, 2020) raportoitiin sisäilmanmitaustuloksia 14 sisäilmaongelmaisesta kohteesta, joissa oli käytetty PAH-yhdistepitoisia rakennusmateriaaleja kuten tervapaperia lattiarakenteissa tai kreosoottijllyllä käsiteltyä puuta mm. kattorakenteissa. Puolassa PAH-yhdistepitoisia materiaaleja on artikkelin mukaan käytetty 1980-luvulle saakka. Osassa kohteita oli käytetty (myös) Xylamite-nimistä kyllästeainetta, jonka komponentteja ovat kloorifenolit, kloorinaftaleenit, polyfenolit ja klooribentseeni. Kohteiden sisäilmasta mitattu naftaleenipitoisuus oli keskimäärin $5\text{--}13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja metyyli- ja dimetyyli-naftaleenien pitoisuudet $3\text{--}17 \mu\text{g}/\text{m}^3$. PAH(16)-summapitoisuutta ei mitattu/raportoitu. Kohteiden ilmassa todettiin myös kloorinaftaleeneja (keskimäärin $8\text{--}31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja muutamista kohteista myös dikloorifenolia (keskimäärin $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Kaikissa edellä mainituissa tutkimuskohteissa sisäilmasta mitatut PAH-yhdisteiden pitoisuudet ovat olleet huomattavan korkeita suomalaisista kohteista mitattuihin verrattuna (vrt. kohta 1.2.1 *Rakennusperäiset PAH-yhdistepitoisuudet suomalaisten rakennusten sisäilmassa*).

1.2.3 PAH-yhdisteiden taustatasot ja muut lähteet

PAH-yhdisteiden lähteitä sisäilmassa ovat kivihiilitervapohjaisten rakennusmateriaalien lisäksi muun muassa:

- tupakansavu
- liikenteen päästöt (erityisesti dieselmoottorit)
- puun pienpoltto
- metsäpalot
- kynttilöiden poltto

- savusauna
- ruuanvalmistus (erityisesti grillaus, savustus)
- PAH-yhdistepitoisia materiaaleja sisältävät kulutustavarat

Kansainvälisten tutkimusten perusteella yhden tupakan savussa on noin 1–1,6 µg PAH-yhdisteitä (PAH(16)). Kaupunki-ilmassa PAH-yhdisteitä on noin 1–30 ng/m³ (0,001–0,03 µg/m³). Luvut eivät sisällä naftaleeneja, joiden pitoisuudet ovat suurempia. Euroopan maaseutualueilla bentso[a]pyreenin pitoisuuden vuosikeskiarvot ovat olleet 0,1–1 ng/m³, kaupunkialueilla 0,5–3 ng/m³ ja tiettyjen teollisuuslaitosten läheisyydessä tasolla ~30 ng/m³. (2010, IARC; Hakola ym. 2009)

Suomessa yhdyskuntailmassa bentso[a]pyreeniä on yleensä alle 1 ng/m³ ja naftaleenia alle 1 µg/m³ (TTL, 2022). Todennäköisesti puun pienpolton takia Suomessa pääkaupunkiseudulla vuonna 2008 tehdyissä mittauksissa bentso[a]pyreenin pitoisuudet olivat pientaloalueella keskimäärin noin viisi kertaa kaupunkialueita korkeampia (YTV, 2009).

Kynttilöiden polttamisessa syntyvien PAH-yhdisteiden päästöt vaihtelevat hyvin paljon kynttilän koostumuksen mukaan. PAH-yhdisteiden kokonaispäästön on mitattu eräissä tutkimuksissa olevan muutamasta mikrogrammasta yli 150 mikrogrammaan poltettua kynttiläkiloa kohden (Oreccio, 2011; Derudi ym. 2013). Polttoprosesseissa syntyy myös muita haitallisia epäpuhtauksia PAH-yhdisteiden lisäksi, esimerkiksi pienhiukkasia, rikkidioksidia, häkää sekä BTEX-yhdisteitä ja muita VOC-yhdisteitä. Suomalaisessa savusaunatutkimuksessa (Häsänen ym. 1984) mitattiin yksittäisten saunojen sisäilmasta saunomisen aikana seuraavia PAH-yhdistepitoisuuksia:

- savusauna: PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus 170–1 550 µg/m³ ja bentso[a]pyreeni 4,6–20 µg/m³
- kertalämmitteinen sauna: PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus 50–90 µg/m³, bentso[a]pyreeni 3,4–4,5 µg/m³
- jatkuvalämmitteinen sauna: PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus 25 µg/m³, bentso[a]pyreeni alle 0,1 µg/m³

Ravinnossa PAH-yhdisteitä voi olla erityisesti grillatussa, savustetussa ja paistetussa ruuassa. Kansainvälisissä tutkimuksissa ravinnon kautta saadun PAH-yhdistemäärän on arvioitu olevan keskimäärin muutamasta nanogrammasta muutamaankin mikrogrammaan henkilöä kohti päivässä (2010, IARC). Ravintoon liittyvän PAH-yhdistealtistumisen lähteenä voivat olla sekä ruoan valmistuksen päästöt että syödyn ruoan sisältämät PAH-yhdisteet. Esimerkiksi grillatessa PAH-yhdisteitä syntyy sekä polttoaineen (hiilet, briketit, kaasu), että ruoan sisältämien orgaanisten yhdisteiden epätäydellisessä palamisessa. Syntyneistä PAH-yhdisteistä osa päätyy ilmaan ja osa ruokaan. Eräissä eri lämmönlähteiden ja kasvien tai lihan grillauksen PAH-yhdistepäästöjä vertaileessa tutkimuksessa todettiin korkeimmat pitoisuudet lihaa kivihiihlibriketeillä kypsennettäessä. Elintarviketollisuuden analytiikassaan käytämä PAH(15)-summapitoisuus oli tällöin suoraan grillin päältä mitattuna noin 380 µg/m³ ja grillimestarin hengitysvyöhykkeellä noin 10 µg/m³. Vastaavat pitoisuudet kasviksia sähkögrillillä ”grillattaessa” olivat noin 2 ja 1 µg/m³ (Badyda ym. 2022). EU:ssa myytävien elintarvikkeiden PAH-yhdistepitoisuuksista on säädetty bentso(a)pyreenin pitoisuuden, sekä neljän PAH-yhdisteen yhteispitoisuuden osalta (PAH(4): bentso(a)pyreeni, bentso(a)antraseeni, bentso(b)fluoranteeni ja kryseeni). Suurin sallittu PAH(4)-yhteispitoisuus vaihtelee tuotetyypistä riippuen välillä 1–35 µg/kg. Bentso(a)pyreenin osalta enimmäispitoisuus vaihtelee tuotetyypistä riippuen 1–6 µg/kg välillä (Euroopan Unioni, 2011).

Kuluttajatuotteiden kumi- ja muoviosissa voi esiintyä epäpuhtauksina PAH-yhdisteitä (Wallenius ym, 2023). Seuraavien PAH-yhdisteiden pitoisuuksia kuluttajatuotteissa on rajoitettu

Euroopassa REACH-asetuksella (REACH-asetus (EY) N:o 1907/2006, LIITE XVII): bentso[a]pyreeni, bentso[e]pyreeni, bentso[a]antraseeni, kryseeni, bentso[b]fluoranteeni, bentso[j]fluoranteeni, bentso[k]fluoranteeni, dibentso[a,h]antraseeni. Listattujen yhdisteiden suurin sallittu yksittäisten PAH-yhdisteiden pitoisuus on 1 mg/kg tuotteissa, jotka ovat pitkän aikaa tai toistuvasti iho- tai limakalvokosketuksessa. Lelujen ja lastenhoitotarvikkeiden kumi- ja muoviosissa raja-arvo on 0,5 mg/kg. Myös autonrenkaissa käytetyn materiaalin PAH-yhdistepitoisuutta on rajoitettu asetuksella. Edellä mainitut rajoitukset eivät koske ennen 27.12.2015 markkinoilla olleita esineitä. Naftaleenia sisältävät koipallot kiellettiin EU:ssa vuonna 2008 (Euroopan Unioni, 2008). Naftaleenin käyttö kosmetiikkatuotteissa on ollut EU:ssa kielletty vuodesta 2009 (Euroopan Unioni, 2009).

Naftaleenia on todettu viime vuosina epäpuhtautena Pohjoismaissa myynnissä olleissa kuluttajatuotteissa (BEUC, 2023). Tämän raportin kirjoittajien kokemusperäinen havainto on, että aistinvaraisesti arvioituna selvästi PAH-yhdistepitoista materiaalia sisältäviä tuotteita (mm. huonekalut, urheiluvarusteet, työkalujen kädensijat, laukkujen muovi/kumiosat yms.) on ollut toisinaan myynnissä vähittäiskaupassa Suomessa viime vuosina ja toisinaan kuntotutkimusten yhteydessä sisäilmassa todetun naftaleenin tai ratapölkyn hajun lähteenä on ollut rakenteiden sijaan jokin tiloissa ollut tavara.

IARC:n arvion mukaan EU:ssa noin miljoona ihmistä altistui työssään PAH-yhdistelle vuosina 1990–1993. PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuudet tuotannollisessa työssä, esimerkiksi kasaamoissa, alumiinintuotantolaitoksissa, kattotöissä ja tienrakennustyössä, ovat vaihdelleet viime vuosikymmeninä tehdyissä tutkimuksissa pääosin muutamasta kymmenestä muutama sataan $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tutkimuksesta riippuen mittaus on kattanut 11–38 eri PAH-yhdistettä, ja ilmoitettu kokonaispitoisuus on ollut näiden summa. Bentso[a]pyreeniä on käytetty usein merkkiaineena työperäistä PAH-yhdistealtistumista määritettäessä. Altistumistasot bentso[a]pyreenille ovat vaihdelleet kansainvälisissä tutkimuksissa pitoisuudesta alle $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ muutama kymmeneen $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IARC, 2010). Suomessa keskimääräiset altistumistasot bentso[a]pyreenille ovat altisteisessa työssä suuruusluokkaa $< 0,01\text{--}1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja naftaleenille suuruusluokkaa $1\text{--}200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TTL, 2010/2016).

1.2.4 PAH-yhdisteiden hajukynnykset

Hajukynnysarvo on hajua aiheuttavan yhdisteen pienen pitoisuus ilmassa, joka on ihmisen aistittavissa. Hajukynnysarvo on määritelmällisesti se pitoisuus yhdistettä, jonka 50 % koulutetuista hajupanelisteista pystyy aistimaan, mutta ei tunnistamaan hajua. Ihmisen hajuaisti on hyvin subjektiivinen kokemuspohjainen aistimus, johon vaikuttaa mm. ihmisen sukupuoli, perimä, ikä ja terveys. Nykyisin Euroopassa hajukynnysarvojen määrittäykset tehdään standardin EN 13725 mukaisesti hyödyntäen tähän tarkoitukseen kehitettyä dynaamista olfaktometriä ja koulutettua ennakkoon valittua hajupaneelia. Standardi EN 13725 on tullut ensikerran voimaan vuonna 2003 ja on sittemmin päivittynyt. Maailmanlaajuisesti hajukynnyksen määrittämiseen on käytössä muitakin menetelmiä, kuten esimerkiksi Triangle Odor Bag -menetelmä (Iwasaki ym. 1978; Nagata, 2003) ja standardin ASTM E679-19 mukainen menetelmä (ASTM, 2019). Hajupaneeleita hyödynnetään mm. rakennustuotteiden M1-testauksessa.

Puhtaiden PAH-yhdisteiden hajukynnysarvot vaihtelevat kirjallisuuslähteiden perusteella hyvin merkittävästi. Esimerkiksi naftaleenin hajukynnysarvot vaihtelevat kirjallisuuden perusteella aina $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuksista $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuksiin (AIHA, 1989). Muiden PAH-yhdisteiden hajukynnysarvoja on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin naftaleenin, mutta kirjallisuudesta on löydettävissä esimerkiksi 2-metyyli-naftaleenille hajukynnysarvo välillä $\sim 4\text{--}337 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja fenantreenille hajukynnysarvo $\sim 55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (AIHA, 1989; Liu ym. 2020; Ruth, 1986). Valitettavasti PAH-yhdisteiden hajukynnysarvot ovat tyypillisesti peräisin vanhoista

julkaisuista, joiden hajukynnysarvojen määritysmenetelmistä on niukasti tietoa saatavilla. Historiallisessa valossa hajukynnysmääritykset ovat olleet hyvin moninaisia ja tulosten tarkkuus ja vertailukelpoisuus on kriittisesti tarkasteltuna haastavaa todentaa (van Harreveld ym. 1999).

Yleisesti ottaen hyvin vanhojen hajukynnysarvojen on arvioitu olevan mm. määritysmenetelmien johdosta hieman suurempia kuin uudelleen, esimerkiksi standardin EN 13725 mukaisesti, määritettyjen ja päivitettyjen hajukynnysarvojen (Bokowa ja Bokowa, 2014). Tämä arvio pohjautuu mm. määritysmenetelmien teknisiin yksityiskohtiin ja hajupanelistien valintakriteereihin. Vanhat hajukynnysarvot saattavat olla peräisin määrityksistä, jotka on tehty esim. ottamalla näyteilmaa kaasutiiviiseen ruiskuun, josta näyte on syötetty haistelijan nenän ulottuville ja tällaisen testimenetelmän avulla on määritetty hajukynnysarvo (St. Croix Sensory, Inc. 2005; Bokowa ja Bokowa, 2014). Dynaamisia olfaktometreja on myös operoitu aiemmin alhaisemmilla näyteilman esitysvirtausnopeuksilla kuin nykyisin ohjeistetaan (esim. 0,5–8 l/min vs. nykyinen suositus ≥ 20 l/min) (Bokowa ja Bokowa, 2014; EN 13725). Vanhemmissa menetelmissä näyteilma on saattanut laimentua/sekoittua huoneilmaan, jolloin hajukynnysarvon pitoisuus on mahdollisesti yliarvioitu (Bokowa ja Bokowa, 2014). Nykyiset määritysmenetelmät, jotka pohjautuvat dynaamisen olfaktometrin käyttöön hyödyntävät erillistä lasisuppiloa, josta näyteilma tulee tietyllä virtausnopeudella ja kohdennetusti haistelijan nenään (EN 13725).

Yksi merkittävimmistä, ellei jopa merkittävin tekijä, hajukynnysmäärityksissä on kuitenkin havaittu olevan hajukynnysmäärityksiin osallistuvalla hajupaneelilla (van Harreveld ym. 1999). Aiemmin määritykset on pyritty tekemään mahdollisimman edustavalla hajupaneeliotannalla, johon on valittu ihmisiä mahdollisimman kattavan ja esim. populaatiotasolla edustavan sukupuoli- ja ikäjakauman perusteella. Vertailututkimuksissa on kuitenkin havaittu, että uusittavimmat ja vertailukelpoisimmat tulokset saavutetaan ns. koulutetulla hajupaneelilla (van Harreveld ym. 1999). Esimerkiksi standardin EN 13725 mukaisesti hajupanelistit valitaan panelistin n-butanolin hajukynnysarvon perusteella siten, että haistelijan herkkyys kemikaalille on melko kapean vaihteluvälin sisällä. Varsinaisesti populaatiotason edustavuudesta on siis hajupaneelien kohdalla luovuttu ja nykyisin hyödynnetään ennakkoon valittuja hajupanelisteja.

1.2.5 Sisäilmapitoisuuksien ohje-, raja- ja viitearvot

Työpaikat

PAH-yhdisteistä bentso[a]pyreenille ja naftaleenille on asetettu lakisääteiset haitalliseksi tunnettujen pitoisuuksien arvot eli HTP-arvot (STM 2020). Bentso[a]pyreenin HTP-arvo on $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 h). Naftaleenin HTP-arvot ovat $5\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 h) ja $10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (15 min). Bentso[a]pyreenin HTP 8h-arvo on arvioitu korkeaksi ja siihen on arvioitu sisältyvän melko suuri laskennallinen keuhkosyövän riski.

Työterveyslaitos on ehdottanut ohjeessaan kahdeksan tunnin terveysperusteisiksi tavoiteta-soiksi bentso[a]pyreenille $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja naftaleenille $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ohje koskee kokaamoja ja muita työpaikkoja, joissa työprosessit sisältävät kivihiihlopohjaisten materiaalien kuumentamista (TTL, 2018).

PAH-yhdisteiden sitova työhygieeninen raja-arvo on tällä hetkellä harkinnassa EU:ssa. Aiheesta on EU:n kemikaaliviraston riskinarviointikomitean suositus, jossa on arvioitu työperäiseen PAH-altistumiseen liittyvä syöpäriski erilaisilla altistumistasoilla (ECHA, 2022). Bentso[a]pyreeni on katsottu syöpävaaran kannalta relevanteimmaksi altistumisen indikaattoriaineeksi PAH-yhdisteille altistuttaessa, ja syöpäriskit on laskettu suhteessa B[a]P-pitoisuuksiin työperäisessä altistumisessa. Tuleva sitova EU-tason raja-arvo bentso[a]pyreenille

PAH-altistumisen markerina tulee todennäköisesti olemaan selkeästi nykyistä 8 tunnin HTP-pitoisuutta alempi, jotta siedettävän ylimääräisen syöpäriskin rajana yleensä työperäisessä altistumisessa pidetty 4 ylimääräistä syöpää 1000 työntekijää kohden työuran mittaisessa altistumisessa ei ylittyisi. Tätä edellä mainittua syöpäriskiä vastaava bentso[a]pyreenin pitoisuus on $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ECHA, 2022). Tuleva sitova raja-arvo tulee todennäköisesti olemaan maksimissaan tätä tasoa.

On huomioitava, että edellä esitetyt syöpäriskit liittyvät jatkuvaan (8 tuntia päivässä, 5 päivää viikossa) ja 40 vuoden työuran ajan kestävään altistumiseen, ja satunnaisessa altistumisessa kyseisen kaltaisen altistumisen aiheuttama lisäriski on huomattavasti pienempi, kertaluonteisessa altistumisessa käytännössä olematon.

Tämän tiedon ja vaikutusarvioinnin pohjalta komissio päättää tulevasta PAH-yhdisteiden raja-arvosta.

Ei-tuotannollisten työpaikkojen osalta Työterveyslaitoksen toimesta on asetettu sisäilman yleinen tavoitetaso naftaleenille. Tavoitetaso on esitetty vain naftaleenille, koska bentso[a]pyreeni ei haihdu ilmaan huoneenlämmössä, ellei työ sisällä edellä mainittuja kuumia prosesseja eikä työssä käsitellä kivihiilipohjaisia materiaaleja. Naftaleenin haihtuvuus on vähintään kymmenkertainen muihin PAH-yhdisteisiin verrattuna. Työterveyslaitoksen asettama yleinen työpaikkojen sisäilman tavoitetaso naftaleenille on $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (TTL, 2018)

Asunnot ja muut oleskelutilat

Terveysturvallisuuden nojalla säädetyn asumisterveysasetuksen (STMa 545/2015) mukainen asunnon ja muun oleskelutilan toimenpideraja-arvo naftaleenille on $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tolueenivas-teella laskettuna). Myöskään naftaleenin hajua ei saa esiintyä. Puhtaan naftaleenin haju on koipallomainen ja eroaa tyyppillisestä PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien hajusta. Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa on tarkennettu, että myöskään kivihiilitervavalmisteille tunnusomaista ratapölkyn hajua ei saa esiintyä (Valvira, 2016, osa III). Puhtaan naftaleenin haju viittaa yleensä muihin kuin rakennusmateriaaliperäisiin lähteisiin.

Asuntojen sisäilman osalta ei ole Suomessa säädetty muiden yksittäisten PAH-yhdisteiden pitoisuuksista tai PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuksista. Muista kuin asumisterveysasetuksessa mainituista altisteista aiheutuvaa terveyshaittaa arvioidaan tapauskohtaisen riskin perusteella.

Saksassa on säädetty yleiset terveysperusteiset RW-ohjeet naftaleenille (RW, Richtwerte; Umweltbundesamt 2023). RW I, joka kuvaa pitoisuutta, jonka alapuolella terveysriskiä ei ole, ja RW II pitoisuutta, jonka ylittyessä terveysriski on olemassa, ja pitoisuuden alentamiseksi tulee ryhtyä viipymättä toimenpiteisiin. RW I -arvo naftaleenille on $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eli sama kuin asumisterveysasetuksen toimenpideraja, ja RW II arvo $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lisäksi on asetettu väliaikaiset RW I- ja RW II-ohjeet 10 ja $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kaksi- ja kolmirenkaisien PAH-yhdisteiden summakonsentraatiolle (naftaleeni, metyloidut naftaleenit, asenafteeni, asenaftyleeni, antraseeni, fluoreeni ja fenantreeni).

Ulkoilma

EU-direktiivin mukainen tavoitearvo ulkoilman bentso(a)pyreenille on $1 \text{ ng}/\text{m}^3$ (EU, 2004).

1.3 PAH-yhdisteiden haitalliset ominaisuudet

Kivihiilitervapohjaisten rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden terveyshaittoja on käsitelty kattavasti Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen tuoreessa julkaisussa *Kivihiilitervatuotteet*

asuinrakennuksissa (Airaksinen ym. 2023). Merkittävimmät huolenaiheet PAH-seosten, kuten kivihiilitervan, kohdalla liittyvät näiden syöpävaarallisuuteen eli karsinogeenisuuteen.

Eri PAH-yhdisteiden syöpävaarallisuus vaihtelee huomattavasti. Merkittävimmät syöpäriskit liittyvät huonosti haihtuviin, suuremman molekyylipainon PAH-yhdisteisiin (taulukko 5). Tästä syystä oleelliset syöpäriskit liittyvät tilanteisiin, joissa nimenomaan näitä – normaalitilanteessa haihtumattomia - yhdisteitä pääsee ilmaan merkittävässä määrin (erityisesti kuumennettaessa PAH-yhdisteitä sisältäviä tuotteita), tai altistumiseen ihokontaktin välityksellä (esim. rakennuspurkutytöt, joissa joudutaan suoraan kontaktiin rakenteiden kivihiilitervan tai kreosootin kanssa).

Bentso[a]pyreenin (B[a]P) syöpävaarallisuus tunnetaan parhaiten, ja sitä käytetään yleisesti karsinogeenisten PAH-yhdisteiden markkerina kivihiilitervapohjaisissa PAH-yhdisteseoksissa ja niiden päästöissä. EU:n kemikaaliviraston tuoreen riskinarvion perusteella esimerkiksi jatkuvan, työuran mittaisen altistumisen B[a]P-pitoisuuksille 0,1 µg/m³ on arvioitu johtavan syöpärisäkiin 56 ylimääräistä syöpää per 100 000 työntekijää (ECHA, 2022). Sisäilmassa tavallisesti pieninä pitoisuuksina mitattujen haihtuvien PAH-yhdisteiden naftaleenin ja fenantreenin syöpävaarallisuus ihmisille on epäselvä ja on arvioitu, että se on vähintään kertaluokkia matalampi kuin esim. B[a]P:llä (ks. taulukko 5, RPF-arvot), mikäli on relevantti ollenkaan. Esimerkiksi naftaleenin kohdalla, vaikka se on aiheuttanut rotilla nenäsyöpiä pitkäaikaiskoikeissa, näiden rotilla havaittujen nenäsyöpien relevanssi ihmisille on kyseenalainen johtuen taustalla olevista mekanismeista ja esim. metaboliaeroista rottien ja ihmisten välillä (ECHA, 2018b). Myöskään fenantreenin tai metyyli-naftaleenin syöpävaarallisuudesta ei ole selkeää näyttöä.

Taulukko 5. PAH-yhdisteiden terveys- ja ympäristövaikutuksiin liittyviä ominaisuuksia.

Yhdiste ^a	IARC-luokitus ^b	RPF US-EPA ^c	PBT-luokitus ^d
EPA PAH(16)-listan yhdisteet			
Naftaleeni	2B	-	-
Asenaftyleeni	ei luok.	-	-
Asenafteeni	3	-	-
Fluoreeni	3	-	-
Fenantreeni	3	-	-
Antraseeni	2B	-	PBT
Fluoranteeni*	3	-	PBT
Pyreeni*	3	-	PBT
Bentso[a]antraseeni	2B	0,1	PBT
Kryseeni	2B	0,001	PBT
Bentso[b]fluoranteeni	2B	0,1	POP
Bentso[k]fluoranteeni	2B	0,01	PBT, POP
Bentso[a]pyreeni	1	1	PBT, POP
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	2B	0,1	POP
Bentso[g,h,i]peryleeni	3	-	PBT
Dibentso[a,h]antraseeni	2A	1	-

Taulukko 5. Jatkuu.

Yhdiste ^a	IARC-luokitus ^b	RPF US-EPA ^c	PBT-luokitus ^d
Tässä tutkimuksessa analysoidut EPA PAH(16)-listan ulkopuoliset yhdisteet			
1-metyyli-naftaleeni	ei luok.	ei luok.	ei luok.
2-metyyli-naftaleeni	ei luok.	ei luok.	ei luok.
7H-bentso[c]-fluoreeni*	3	ei luok.	ei luok.
5-metyyli-kryseeni	2B	ei luok.	ei luok.
dibentso[a,l]pyreeni	2A	ei luok.	ei luok.
dibentso[a,e]pyreeni	3	ei luok.	ei luok.
dibentso[a,i]pyreeni	2B	ei luok.	ei luok.
dibentso[a,h]pyreeni	2B	ei luok.	ei luok.

^a Listan lihavoidut yhdisteet esiintyvät kaasufaasissa ja voivat esiintyä rakennusten sisäilmassa normaalissa tilanteessa. *Puolihihaittava PAH-yhdiste. ^b IARC-luokitus: 1: karsinogeeninen eli syöpää aiheuttava, 2A: todennäköisesti karsinogeeninen, 2B: mahdollisesti karsinogeeninen, 3: ei luokiteltavissa. Lähde: IARC, 2024. ^c Relative Potency Factor, kuvaa yhdisteen suhteellista haitallisuutta, tässä bentso[a]pyreeniin verrattuna, lähde: EPA, 2023. ^d PBT: persistent, bioaccumulative and toxic; pysyvä, kertyvä ja ympäristölle myrkyllinen yhdiste; POP: persistent organic pollutant, lähde: ECHA, 2024.

1.4 PAH-yhdisteiden mittaussmenetelmät

Tässä luvussa on esitetty Suomessa yleisesti käytössä olevat PAH-yhdisteiden tutkimusmenetelmät. Tutkimushankkeessa käytetyt menetelmät on esitetty luvussa 2.

1.4.1 Ilmanäytteet

Koska asuinrakennuksissa normaalitilanteissa altistuminen PAH-yhdisteille tapahtuu hengityksen kautta, hengitysilman PAH-pitoisuudet ovat oleellisia niiden terveysriskiä arvioitaessa.

Sisäilmanäytteet kerätään yleensä XAD-adsorbenttiharalla täytettyyn keräinputkeen 1L/min nopeudella. Riittävään määritysrajaan päästään keräämällä noin 100 L ilmaa. Tämä menetelmä mittaa kaasufaasissa olevien PAH-yhdisteiden määrää (esimerkiksi naftaleeni, fenantreeni ja fluoranteeni).

Hiukkasfaasissa olevia PAH-yhdisteitä (esimerkiksi bentso[a]pyreeni) tarkemmin tutkittaessa kerätään hiukkasia teflon-suodattimelle johtamalla sen läpi yli 400 L ilmaa. Hiukkasfaasia voidaan kerätä esim. purkuvaiheessa työntekijöiden altistumisen arvioimiseksi. Normaalitilanteissa sisäilmassa ei esiinny merkittäviä määriä hiukkasfaasin PAH-yhdisteitä, joten sisäilmatutkimuksissa ei suodatinnäytteitä ole lähtökohtaisesti tarpeen kerätä.

Analysimenetelmänä käytetään pääsääntöisesti kaasukromatografia-massaspektrometriaa (GC-MS). Aikaisemmin käytettiin enemmän liekki-ionisaatiotektoriä (engl. flame ionisation detector, FID) massaspektrometrin sijaan. Laajan PAH-yhdistekirjon takia ja hyvin lähellä tai päällekkäin eluoituvien yhdistepiikkien takia FID-detektoria ei suositella, koska se ei ole riittävän selektiivinen.

Ilmanäytteiden PAH-analytiikassa esikäsittely- ja analyysimenetelmät eivät ole standardisoituja, joten niiden välillä saattaa olla eroa. Suomen Ympäristökeskuksen järjestämän vertailukierroksen raportista käy kuitenkin ilmi, että suurin osa laboratorioista käyttää dikloorimeetaania uuttoliuottimena ja uuttoa tehostetaan ultraäänillä. Vaikka menetelmät saattavat erota, akkreditointi takaa menetelmän luotettavuuden (Leivuori ym. 2023).

1.4.2 Materiaalinäytteet

Materiaalinäytteet analysoidaan samalla menetelmällä kuin ilmanäytteet. Pitoisuuseron takia kalibrointialue on yleensä laajempi, näytteistä analysoidaan sopivat laimennokset ja uuttoluottimen määrä on suurempi kuin ilmanäytteissä. Lisätietoa Suomessa käytetyistä menetelmistä löytyy Suomen Ympäristökeskuksen vertailukierrosraportista (Koivikko ym. 2022).

1.4.3 Rakennusmateriaalien emissioiden tutkimusmenetelmät

Rakennusmateriaalien päästö- eli emissiotutkimuksissa selvitetään haihtuvien yhdisteiden vapautumista rakennusmateriaaleista ilmaan. Rakennusmateriaalien emissiotutkimuksiin käytettävistä menetelmistä kansallisella tasolla tunnetuimpia ovat kokonaisemissiotutkimus eli bulk-menetelmä (mikrokammiotekniikka), pintaemissiomittaus FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) -menetelmällä ja pintaemissiomittaus emissiokammioimenetelmällä (Leino ym. 2020). Näistä menetelmistä bulk- ja FLEC-menetelmät ovat yleisesti sisäilmaongelmia selvittävässä tutkimuksessa käytössä ja erityisesti kohteessa asennetuista materiaaleista, kun taas pintaemissioskammio-menetelmä on tyypillisesti uusien rakennusmateriaalien emissioiden selvittämisessä käytössä. Yleisesti ottaen, menetelmien avulla tutkitaan erityisesti standardin ISO 16000-6 mukaisesti määritettävien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (engl. Volatile Organic Compounds, VOC) emissioita. Emissiotutkimusmenetelmien avulla voidaan tutkia myös muita yhdisteitä, kuten erittäin haihtuvia yhdisteitä (esim. formaldehydi, asetraldehydi ja ammoniakki) ja heikosti haihtuvia yhdisteitä (SVOC-yhdisteet, esim. ftalaatit ja PAH-yhdisteet).

Bulk-tutkimus

Kokonaisemissiotutkimuksen eli bulk-tutkimuksen avulla saadaan arvio rakennusmateriaalin ns. kokonaisemissio potentiaalista. Bulk-tutkimuksessa näyte kappale asetetaan mikroemissioskammioon (kammio tilavuus n. 44 ml), johon johdetaan puhdasilmaa tai inerttiä kaasua ja stabiloitumisajan jälkeen emissionäytteet kerätään näytekeraimeen. Mikrokammion lämpötilaa voidaan kontrolloida huoneilman lämpötilasta aina 120 °C:een. Tutkimukseen tarvittava rakennusmateriaalin näytemäärä on verrattain pieni (n. 1–10 g rakennusmateriaalinäytettä), mutta kohteesta asennettuja rakennusmateriaalinäytteitä otettaessa menetelmä vaatii rakenteiden rikkomista. Bulk-menetelmää pidetään tavanomaisesti semikvantitatiivisena menetelmänä, sillä tyypillisesti rakennusmateriaalien näyte kappaleet eivät ole täysin homogeenisia tai niitä ei käsitellä homogeeniseksi massaksi, jolloin käytännössä mittaustulokset eivät ole yksiselitteisen vertailukelpoisia. Tyypillisesti bulk-menetelmällä selvitetään esim. muovimattojen, liimojen, tasoitteiden ja betonin VOC-pitoisuuksia sisäilmaongelmallisista kohteista. Rutiininomaisessa kokonaisemissiotestauksessa rakennusmateriaalinäytteet pilkotaan pieniksi paloiksi (esim. noin 1 cm x 1 cm kokoluokan palasiksi) ja näyte kappaleet punnitaan mikroemissioskammioon, jolloin tulokset voidaan esittää yhdistekohtaisesti esim. yksiköissä mikrogrammaa kuutiometriä ja näytegrammaa kohti ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$). Bulk-menetelmä onkin verrattain nopea ja kustannustehokas tapa selvittää rakennusmateriaalin kokonaisemissiot ja kartoittaa mahdollisesti ongelmallisia sisäilman päästölähteitä. Bulk-menetelmällä saavutettuja rakennusmateriaaliemissioiden tuloksia ei voida kuitenkaan hyödyntää sisäilmapitoisuuksien selvittämiseen eikä emissioille ole varsinaisia viitearvoja. Työterveyslaitoksella on kuitenkin kattavan mittaushistorian ansiosta viitearvoja (90. persentiili) esim. muovimattojen (PVC) ja betonin TVOC- ja 2-etyyliheksanolin pitoisuuksille.

Mikrokammioimenetelmää voidaan myös soveltaa pintaemissiotutkimukseen, jolloin näyte kappale leikataan tarkasti mikroemissioskammion sopivaan muotoon (esim. mikroemissioskammioon asetetuksi n. 44 mm halkaisijan kappaleeksi), ja näyte kappaleen leikkuureunat ja tausta peitetään tai vaihtoehtoisesti käytetään erillisiä muotteja tähän tarkoitukseen. Tällöin avoimen näyte pinta-alan, mikroemissioskammiotilavuuden ja kammion ilmanvaihtokertoimen avulla voidaan

laskea pintaemissionopeus esim. yksiköissä $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$ tai punnitun näytemäärän mukaisesti $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ (kts. seuraava kappale). Bulk-menetelmää onkin sovellettu erilaisten PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien pintaemissionopeuksien selvittämiseen (Knag ym. 2012). Naftaleenin emissionopeudet vaihtelivat materiaalista riippuen kanadalaisessa vertailututkimuksessa keskimäärin välillä $0,99\text{--}78,17 \mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$ (kiinteät materiaalit, esim. viinylilattiat, lattiamatot, puupaneelit ja vaahtomuovimatto) ja välillä $0,01\text{--}95,01 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ (nestemäiset tuotteet, esim. maalit, pohjusteet, liimat ja tiivisteaineet) (Knag ym. 2012). Mikrokammiomenetelmän soveltaminen pintaemissionopeuksien määrittämiseen on kuitenkin verrattain ongelmallista (Backlund ym. 2009).

Pintaemissiotutkimukset FLEC- ja pintaemissiokammiometelmillä

Pintaemissiomittaukset ovat tavanomainen menetelmä rakennusmateriaaliemissioiden selvittämiseen. Pintaemissiomittauksen perusteella määritetään emissionopeus, joka kuvaa emittoituneiden yhdisteiden massan tuoteyksikköä ja aikayksikköä kohden määrätyn ajan kuluttua testin aloittamisesta (EN 16516). Pintaemissiomenetelmistä tunnetuimmat ja vakiintuneimmat ovat FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) -menetelmä ja ns. pintaemissiokammiomenetelmä. FLEC-menetelmää voidaan hyödyntää rakenteita rikkomatta, kun taas pintaemissiokammiomenetelmä vaatii erillisen rakenteesta/rakennusmateriaalista otettavan näytekappaleen.

Yhdisteen emissionopeus pinta-alaa kohden voidaan laskea yhtälön (1) mukaisesti:

$$SER = \frac{c_a \times AC_t}{L_t} \quad (1)$$

, jossa SER on pintaemissionopeus [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$], c_a on yhdisteen pitoisuus testauskammion ilmanäytteessä [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], AC_t on testauskammion ilmanvaihtokerroin (1/h) ja L_t on kuormituskerroin testauskammiossa [m^2/m^3]. Kuormituskerroin (L_t) osoittaa näytteen avoimen pinta-alan suhteessa testikammion tilavuuteen.

Pinta-alakohtaisen emissionopeuden perusteella voidaan arvioida myös yhdisteen pitoisuus referenssihuoneessa eli ns. mallihuoneessa yhtälön (2) perusteella:

$$c_R = \frac{SER \times L_R}{AC_R} \quad (2)$$

, jossa c_R on mallihuonepitoisuus [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], SER on pintaemissionopeus [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$], L_R on kuormituskerroin mallihuoneessa [m^2/m^3] ja AC_R on ilmanvaihtokerroin mallihuoneessa [1/h].

FLEC

FLEC-menetelmä on tyypillisesti kenttäolosuhteissa käytettävä mittausten menetelmä, jossa FLEC-kammiolaite asetetaan tiiviisti tasaiselle mittausalustalle. FLEC-mittalaitteistoon kuuluu pienimuotoinen metallinen emissiotestikammio (kammiotilavuus 35 ml, sisähalkaisija 150 mm ja testipinta-ala $0,0177 \text{ m}^2$) ja standardin ISO 16000-10 mukaisesti tehtävissä mittauksissa puhdasilma- ja vesilaitteisto, jonka avulla mittausolosuhteet ovat säädetty lämpötilaan $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteelliseen kosteuteen $50 \pm 5 \text{ } \%$. FLEC-mittauksia tehdään myös standardin NT build 484 mukaisesti, jolloin käytettävä emissiotestikammio on sama, mutta mittausolosuhteita ei ole säädelty. Standardin NT build 484 mukaisesti tehtävät mittaukset ovat suoraviivaisempia ja edullisempia toteuttaa kuin ISO 16000-10 mukaisesti tehtävät mittaukset, mutta emissiotulokset eivät ole vertailukelpoisia mm. käytännön olosuhdevaihteluitten takia.

FLEC-mittausten edellytyksenä on, että emissiokammio saadaan asennettua tiiviisti tutkittavan materiaalin pintaan. Tyypillisesti FLEC-mittauksia tehdään lattiapinnoilta, esim. muovimatoista ja betonista, sillä käytännössä seinä- tai kattopinnoilta tehtävät mittaukset voivat olla haastavia toteuttaa (Leino ym. 2020). FLEC-menetelmän etuna verrattuna muihin yleisesti tunnettuihin materiaaliemissiotutkimusmenetelmiin on, että FLEC-menetelmä ei lähtökohtaisesti vaadi rakenteiden rikkomista/purkamista, mittauspisteitä voidaan ottaa useista eri kohdista ja eri ajankohtina uusittavasti. FLEC-laitteistolla saadaan haihtuvien yhdisteiden emissioiden pintaemissionopeustulokset yksiköissä $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$. FLEC-menetelmällä saavutetuille rakennusmateriaaliemissioille ei ole varsinaisia viitearvoja.

Pintaemissiokammio

Pintaemissiokammio menetelmä on laboratorio-olosuhteissa käytettävä mittausmenetelmä, jossa rakennusmateriaalista otettu edustava näytekappale asetetaan emissiotestikammioon. Emissiotestikammioiden kokoluokka voi vaihdella melko paljon, tyypillisesti pienimuotoisista 20–250 litran testikammioista suurempiin 1–50 m³ testikammioihin tai kammiohuoneisiin. Laajasti uusien rakennusmateriaalien ja kalusteiden päästöluokituksissa käytettävät pintaemissiokammio menetelmät pohjautuvat standardeihin ISO 16000-9 ja/tai EN 16516. Esimerkiksi kansallisella tasolla hyvin tunnettu M1-päästöluokitus hyödyntää ISO 16000-9 ja EN 16516 mukaista pintaemissiomittausta rakennusmateriaalien laboratoriotutkimuksen osana.

Pintaemissiokammio menetelmän etuna verrattuna muihin aiemmin mainittuihin rakennusmateriaalien emissiotutkimusmenetelmiin on, että mittausolosuhteet ovat hyvin vakioituneet ja kontrolloidut (esim. lämpötila 23 ± 1 °C, suhteellinen kosteus 50 ± 5 %, ilmanvaihtokerroin 0,5 (± 5 %) 1/h ja ilman virtausnopeus näytekappaleen yläpuolella 0,1–0,3 m/s), ja pintaemissiotulokset ovat lähtökohtaisesti hyvin vertailukelpoisia. Standardissa EN 16516 esitetyn eurooppalaisen referenssihuoneen mitat ja olosuhteet sekä rakennusmateriaalien tyypillisten käyttösovelluksien ja käyttökohteiden perusteella määritetyt kuormituskertoimet (kts. yhtälöt 1–2) ovat tarkasti säädettyjä, jolloin mm. emissionopeuksien perusteella johdetut mallihuonepitoisuudet ovat teoriassa hyvin vertailukelpoisia ja toistettavia (erityisesti käyttämättömien ja uusien rakennusmateriaalien kohdalla). Myös näytekappaleiden käyttösovelluskohteiset esikäsittelymenetelmät ovat määritettyjä/standardoituja, mikä lisää teoriassa tulosten vertailukelpoisuutta. Esimerkiksi emissiokammio menetelmän vertailukierroksissa VOC-yhdisteiden suhteellinen keskihajonta on ollut ≤ 30 % eri laboratoriotulosten perusteella.

Rakennusmateriaalien ja ympäristömerkkien päästöluokituksissa (esim. M1-päästöluokitus, Joutsenmerkki, EMICODE ja A+) pintaemissiomittaukset suoritetaan tyypillisesti uusista rakennusmateriaaleista 3 vrk:n ja/tai 28 vrk:n vakio-olosuhteissa tapahtuvan vanhennusjakson jälkeen. Päästöluokituksissa tarkastellaankin useimmiten materiaalien pitkäaikaisia ominaisuuspäästöjä eikä välttämättä olla kiinnostuneita materiaalien primääripäästöistä tai päästöistä mahdollisen vaurioitumisen johdosta. Eri päästöluokituksilla ja ympäristömerkeillä on erilaisia pintaemissionopeuksien tai mallihuonepitoisuuksien raja-arvoja. Tyypillisesti raja-arvot ovat esitetty esimerkiksi TVOC-pitoisuudelle, formaldehydille ja EU-LCI-lisäyksen yhdisteille.

Pintaemissiotestit voidaan tehdä myös käytetyistä rakennusmateriaaleista, mutta huomion-arvoista on tällöin, että emissiokammion tilavuudesta riippuen tarvittava näytekappalemäärä voi olla hyvinkin suuri ja rakenteita voi joutua rikkomaan kohteessa kohtuuttoman paljon. Kuten edellä mainittiin, standardien ISO 16000-9 ja EN 16516 mukaisesti tehtävissä pintaemissiotestauksissa rakennusmateriaalien käyttösovelluskohteiset kuormituskertoimet (eli näytekappaleen avoimen pinta-alan suhde testauskammion tilavuuteen) ovat tarkasti

määriteltyjä. Kuormituskertoimet on jaettu tyypillisesti neljään kategoriaan standardin EN 16516 mukaisesti: $1,0 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (seinäpinta), $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (lattia- tai kattopinta), $0,05 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (pienet pinnat) ja $0,007 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (hyvin pienet pinnat). Käytännössä yleisemmin käytettyjen emissiotestauskammioiden koot vaihtelevat välillä 100–250 litraa. Tällöin esimerkiksi seinäpinta-alan kuormituskertoimella rakennusmateriaalia (esim. seinälevyt tai seinämaalit) tarvitaan 100–250 litran testauskammioon n. $0,10\text{--}0,25 \text{ m}^2$ pinta-alan verran, kun taas lattiapinta-alan kuormituskertoimella rakennusmateriaalia (esim. parketti, lattialankku, lattiatasoite tai lattiamaaali) tarvitaan testauskammioon n. $0,05\text{--}0,10 \text{ m}^2$ pinta-alan verran. Emissiotestauskammioista tehtävissä mittauksissa rakennusmateriaalituotteen käyttösovelluskohtainen kuormituskerroin voi kuitenkin vaihdella standardin EN 16516 mukaisesti välillä 50–200 % määritetystä referenssihuoneen kuormituskertoimesta (ts. tarvittava näytekappaleen pinta-ala emissiotestauskammiossa voi olla 50 % tavoiteltua referenssihuoneen kuormituskerrointa pienempi). Pintaemissiotestauksiin tarvittavat näytemäärät EN 16516 mukaisesti voivat olla käytännössä hyvin suuria, riippuen toki laboratorioissa käytettävissä olevista testauskammioiden kokoluokista, jolloin näytekappaleiden ottaminen käyttökohteesta voi vaatia merkittävää rakenteiden rikkomista. Käytettyjen rakennusmateriaalien pintaemissiotutkimukset emissioikammioimenetelmällä ovatkin tämän takia melko harvinaisia.

1.5 PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien päästöjen hallinta

1.5.1 Haitta-ainetutkimus

Haitta-ainetutkimuksen tarkoituksena on selvittää rakenteissa sekä teknisissä järjestelmissä esiintyvät haitalliset aineet ja niiden määrä. Haitta-ainetutkimuksen toteuttaminen ei ole lakisääteistä, mutta valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta velvoittaa rakennuttajaa (yleensä kiinteistön omistajaa) olemaan selvillä rakennushankkeeseen liittyvistä mahdollisista vaara- ja haittatekijöistä. Purkujätteen luokittelua varten on myös oltava tiedossa haitallisten aineiden läsnäolo. Näin ollen haitta-ainetutkimus on toteutettava lähes aina ennen rakenteita rikkovia korjaus- tai purkutöitä. Haitta-ainetutkimukseen sisältyy aina lakisääteinen, VNa 798/2015 mukainen asbestikartoitus.

Ohjekortissa RT 103501 (Rakennustieto, 2022a) Haitalliset aineet rakennuksissa - Tutkijan ohje on ohjeistettu haitallisia aineita sisältävien materiaalien tutkimista ja analysointia. RT-kortissa haitta-aineella tarkoitetaan ”rakennusmateriaalissa olevaa kemiallista yhdistettä tai kuitumaista silikaattimineraalia, jolle altistuminen voi aiheuttaa terveyshaittaa ja/tai se voi olla ympäristölle haitallinen”. Ohjekortissa RT-103500 Haitalliset aineet rakennuksissa - Tilaajan ohje (Rakennustieto, 2022b), perehdytään muun muassa haitallisia aineita koskevaan lainsäädäntöön ja rakennushankkeen eri osapuolten vastuisiin.

Haitta-ainetutkimuksessa pyritään selvittämään rakennuksessa olevat aineet ja niiden määrä. Tutkimuksen tekijältä edellytetään muun muassa perehtyneisyyttä eri haitta-aineiden esiintymiseen ja altistusreittien tuntemusta. Tutkittavan rakennuksen rakennusajankohdalla ja korjaus- ja käyttöhistorialla on vaikutusta rakennuksesta mahdollisesti löytyviin haitta-aineisiin. Haitta-ainetutkimuksella saatuja tietoja hyödynnetään rakennuksen korjaus- ja purkutöiden suunnittelussa ja toteutuksessa siten, että työt voidaan toteuttaa turvallisesti. Haitta-ainetutkimus tehdään yleensä korjaus- ja purkutöiden turvallisuuden ja jätteenkäsittelyn kannalta, mutta todettujen haitallisten aineiden terveydellinen merkitys tilojen käyttäjille rakennuksen nykytilanteessa tulee myös huomioida. (Rakennustieto, 2022a)

Rakennuksissa olevien materiaalien PAH-yhdistepitoisuuksille ei ole määritetty sisäilmaperusteisia raja-arvoja. Haitta-ainetutkimuksessa kaikista mahdollisesti PAH-yhdisteitä sisältävistä rakennusmateriaaleista analysoidaan PAH(16)-summakonsentraatio. Selvitys tehdään ensisijaisesti rakennusmateriaalien purkutyön turvallisuutta silmällä pitäen ja

purkujätteenkäsittelyä varten. PAH-yhdistepitoisten materiaalien purkutyöstä on ohjeistettu Ratu-kortissa *Ratu 82-0381 Kivihiilipikeä sisältävien rakenteiden purku. Osastointimenetelmä* (Rakennustieto, 2011). Yksittäisille PAH-yhdisteille on annettu erikseen vaarallisen jätteen raja-arvot (Wahlström ym., 2006; Ympäristöministeriö, 2019). Materiaalin PAH(16)-raja-arvon ylittyessä purettavaa materiaalia tulee käsitellä kuin vaarallista jätettä. Vaarallisen jätteen raja-arvo ei kuvaa ehjistä rakennusmateriaalista aiheutuvia sisäilmariskejä tai toimenpidetarvetta. Kyseistä raja-arvoa saatetaan kuitenkin päätyä virheellisesti käyttämään sisäilmariskien ja rakenteiden korjaustarpeen arvioinnissa, koska muitakaan materiaalititeisuuden raja-arvoja ei ole saatavilla.

Mikäli tutkimusten perusteella on syytä epäillä, että rakennuksessa todetut PAH-yhdistepitoiset rakennusmateriaali voivat aiheuttaa sisäilma- tai terveyshaittaa, tarvitaan yleensä aina sisäilmamittauksia ja muita selvityksiä rakenneavausten ja otettujen rakennusmateriaalinäytteiden lisäksi. Sisäilmamittaukset on suositeltavaa tehdä ennen rakenneavauksia, jotta avauksista tulevat päästöt eivät vääristä tuloksia. Yleensä sisäilmariskejä arvioitaessa tutkitaan vain kaasufaasissa esiintyvät PAH-yhdisteet, mutta mikäli on syytä epäillä, että PAH-yhdistepitoisesta rakennusmateriaalista on vapautunut hiukkasia huoneilmaan esimerkiksi purkutöiden seurauksena, voidaan tapauskohtaisesti harkita myös hiukkasfaasin yhdisteiden mittausta. (Rakennustieto, 2022a; Airaksinen ym. 2023)

1.5.2 Toimenpidetarpeen arviointi, kansalliset ohjeet

Rakennusmateriaaleista aiheutuvien PAH-yhdistepäästöjen toimenpidetarpeen arviointiin on annettu kappaleessa 1.2.5 esitettyjä sisäilman toimenpide- ja viitearvoja sekä lakisääteisiä haitalliseksi tunnettuja pitoisuuksia. Lähtökohtaisesti sisäilmahaitan arvioinnissa sovelletaan asuntojen ja muiden oleskelutilojen kuten koulujen ja päiväkotien osalta asumisterveysasetuksen toimenpideraja-arvoja, tuotannollisilla työpaikoilla HTP-arvoja ja toimistotyypillisillä, ei-tuotannollisilla työpaikoilla Työterveyslaitoksen näille ympäristöille esittämiä viitearvoja (STM, 2015; STM, 2020; TTL, 2023).

Asumisterveysasetuksen toimenpiderajalla tarkoitetaan pitoisuutta, mittaustulosta tai ominaisuutta, jolloin sen, kenen vastuulla haitta on, tulee ryhtyä terveydensuojelulain mukaisiin toimenpiteisiin terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa sen poistamiseksi tai rajoittamiseksi (STM, 2015). Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa (Valvira, 2016, osa III) on tarkennettu muun muassa kemiallisten epäpuhtauksien sekä hiukkasten ja kuitujen tutkimukseen liittyviä ohjeita. Muiden, kuin asetuksessa mainittujen PAH-yhdisteiden osalta tulee terveydensuojelulaissa tarkoitettua terveyshaittaa arvioida aina tapauskohtaisesti, parhaan käytettävissä olevan tiedon pohjalta.

Asunnoissa ja muissa oleskelutiloissa toimenpideraja-arvojen ylittyessä on siis ryhdyttävä selvittämään havaittujen pitoisuuksien tai hajujen aiheuttajaa ja tapaa, joilla mahdollinen haitta saadaan poistettua tai hallittua. Vastaavasti työpaikoilla on ryhdyttävä lisäselvityksiin sekä tarpeellisiin toimenpiteisiin, mikäli lakisääteiset haitalliseksi tunnetut HTP-arvot ylittyvät (TTL, 2020). Toimistotyypillisille työpaikoille, joiden työ ei ole altisteista, Työterveyslaitos suosittelee sisäilmaongelmien selvittelyn lähtökohdaksi viitearvoja, jotka PAH-yhdisteiden osalta perustuvat kohdassa 1.2.5 esitettyyn naftaleenin yleiseen tavoitetasoon (TTL, 2018; TTL, 2023).

Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen ohjeessa on kuvattu suositeltava etenemistapa tilanteessa, jossa epäillään PAH-yhdistepitoisten materiaalien aiheuttamaa sisäilmahaittaa asunnossa tai muussa terveydensuojelulain mukaisessa oleskelutilassa (Airaksinen ym. 2023). Tyypillisesti tarvittavat selvitykset ovat rakennusterveys- ja/tai haitta-aineasantuntijan toteuttamia sisäilma- tai rakenneteknisiä tutkimuksia. Tutkimuksiin voidaan soveltaa edellä

mainittujen lakien, asetusten ja ohjeiden lisäksi muun muassa haitta-aineita käsitteleviä ohjekortteja (Rakennustieto, 2022a ja 2022b) sekä opasta *Rakennuksen kosteus- ja sisäilma-tekniinen kuntotutkimus* (Pitkäranta, 2016), joka käsittelee rakennuksen kuntotutkimusten toteutusta ja suunnittelua, rakennusmateriaalien tunnistamista sekä sisäilmaongelmien selvittämistä. Tutkimusten tavoitteena on selvittää sisäilmassa esiintyvä haitan voimakkuus, paikantaa päästölähde ja arvioida soveltuvia menetelmiä päästöjen vähentämiseksi viitearvot alittavalle tasolle.

1.5.3 PAH-yhdistepitoisen materiaalin purku, rakenteiden korjaus- ja hallintamenetelmät

Asiantuntija arvioi tutkimusten tulosten, kuten aistinvaraisten havaintojen, sisäilman PAH-yhdisteiden pitoisuuksien, rakenneteknisten tietojen, mm. PAH-yhdisteitä sisältävän rakenteen ilmatiiveyden perusteella tapauskohtaisesti mahdollista haittaa tilojen käyttäjillä ja tarvittavia toimenpiteitä, joilla haitta saadaan poistettua tai hallittua.

PAH-yhdistepitoisten materiaalien hallintatoimenpiteet eivät välttämättä ole tarpeen, mikäli selvityksissä todetaan, että päästöjä ei kulkeudu hengitysilmaan haitallisia pitoisuuksia. Myöskään PAH-yhdisteitä sisältävien materiaalien poistaminen ei usein ole tarpeen tai edes mahdollista, jos niiden aiheuttamat haitat voidaan jollain muulla tavalla luotettavasti estää. (Airaksinen ym. 2023)

PAH-yhdisteitä sisältävien rakenteiden korjaamiseen ei ole erillistä korjausohjetta. Korjaussuunnittelijalta edellytetään yleensä vaativan tai poikkeuksellisen vaativan suunnittelijan pätevyyttä joko rakennusfysikaalisesta korjaussuunnittelusta tai kosteusvaurion korjaustyön suunnittelusta sekä perehtyneisyyttä haitta-aineiden hallintaan. PAH-yhdisteiden kapselointiin on tutkitusti toimivia kapselointiaineita ja niihin on saatavilla muun muassa tuotevalmistajien ohjeita. Suuntaa-antavia korjausohjeita on esitetty muun muassa Ympäristöministeriön julkaisussa *Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus* (Weijo ym. 2019).

Mikäli PAH-yhdisteitä sisältäviä rakenteita puretaan, tulee purkutyö tehdä haitta-ainepurkuna. PAH-yhdistepitoisia materiaaleja purettaessa ilmaan vapautuu hiukkas- ja höyrymäisiä ainesosia. Purkutyötavoista riippuen hiukkasmaisten ja höyrymäisten PAH-yhdisteiden pitoisuudet voivat nousta yli haitalliseksi tunnettujen pitoisuuksien. Purkutyössä PAH-yhdisteille voidaan altistua haitallisessa määrin ihon ja hengitysilman kautta. Tämä asettaa purkutyöntekijöiden ja ympäristön suojaamiselle erityisvaatimuksia (Rakennustieto, 2022a).

PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien purkamista on ohjeistettu Ratu-kortissa 82-0381 *Kivihiilipikeä sisältävien rakenteiden purku. Osastointimenetelmä* (Rakennustieto, 2011). Ohjekortti sisältää PAH-yhdisteitä sisältävien rakenteiden purkutyön osastoivan työmenetelmän eri vaiheineen sekä ohjeita ympäristön ja työntekijöiden suojauksesta, turvallisuuden varmistamisesta sekä purkutyön laadunvarmistamisesta.

PAH-yhdisteitä sisältävien rakenteiden purkutyö tehdään yleensä omana purkutyönä ennen muita purkuja, pääsääntöisesti osastointimenetelmällä. Purkutyön toteuttaja laatii työstä purkusuunnitelman. Purkualue ja sitä ympäröivä tila eristetään ilmanvaihdollisesti muista tiloista ja osasto alipaineistetaan. Purkutyössä vapautuvien kaasujen ja PAH-yhdisteitä sisältävän pölyn kulkeutuminen osaston ulkopuolelle tulee estää. Osaston sisällä voidaan käyttää kohdepoistoa tehostamassa kaasujen ja pölyn poistoa. (Rakennustieto, 2011)

Haitta-ainepurkutyön osastoinnin tiiveyttä työn aikana ja sen jälkeen voidaan arvioida laadunvarmistusmittauksilla, joko ilmanäytteillä tai pyyhintänäytteillä, jotka otetaan osaston ulkopuolelta. Useat PAH-yhdisteistä esiintyvät ilmaa raskaampina ja ovat sitoutuneina pölyyn, jota vapautuu materiaalia purettaessa. Hiukkasmaisia PAH-yhdisteitä tutkittaessa tulee ilmanäytteen keräys tehdä aggressiivisella menetelmällä, jossa pintoja harjataan

säännöllisin väliajoin, tutkittavan tilan pinnoille kertyneen pölyn liikkeelle saamiseksi. Pinnoille laskeutuneen pölyn PAH-yhdistepitoisuudet voidaan tutkia myös pinnoilta pyyhintänäytteellä. Näyte otetaan pyyhkimällä vähintään 10 cm × 10 cm pinta-ala etanoliin kostutetulla pumpulitupolla. PAH-yhdisteitä voi imeytyä rakennusmateriaalista ympäröiviin rakenteisiin kuten tiileen tai betoniin, joten purkutyon jälkeen/aikana tulee selvittää myös ympäröivien rakenteiden PAH-yhdistepitoisuudet rakennusmateriaalianalyysillä. (Rakennustieto, 2022a)

2 Tutkimusasetelma, aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusasetelma

PAHSIS-hankkeen tutkimuskohteina oli yhteensä viisi eri ikäistä rakennusta. Kohteista on käytetty nimityksiä Kohde 1...Kohde 5. Kohteissa oli lähtötietojen perusteella joko yksi tai useampi, aiemmissa tutkimuksissa todettu PAH-yhdistepitoinen rakennusmateriaali. Kohteista 3 ja 4 on otettu tutkimukseen kaksi erilaista, eri rakenteissa ja tiloissa esiintynyttä rakennusmateriaalia.

Tarkasteltavat analyysisarjat on nimetty rakennusmateriaalin näytenumeroinnin mukaan Materiaali 1...Materiaali 6. Kuhunkin analyysisarjaan PAH(16)-yhdisteille sisältyvät materiaalinäytteet (mg/kg); sisäilmanäytteet $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (normaalissa käyttötilanteessa, alipaineessa ja PAH-yhdistepitoista materiaalia purettaessa); PAH-yhdisteiden kokonaisemissiopotentiaali bulk-menetelmällä ($\mu\text{g}/\text{g}\cdot\text{m}^3$) sekä kammiotekniikalla suoritettava pintaemissiotutkimus ($\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$). Lisäksi materiaalinäytteistä analysoitiin kuusi PAH(16)-listan ulkopuolista PAH-yhdistettä ja ilmanäytteistä analysoitiin kaksi PAH(16)-listan ulkopuolista yhdistettä.

Yksittäisten PAH(16)-yhdisteiden ja niiden summakonsentraatio määrittäminen sekä bulk-mittaus tehtiin joko erillisestä noin 10 cm x 10 cm materiaalinäytteestä tai suuremmista irrotetuista laboratorioissa preparoiduista näytepalloista. Rakenteesta irrotettiin kammiomittausta varten suuria, kokonaispinta-alaltaan noin 0,5...1,5 m² näytepalloja. Näytteen kokonaispinta-ala koostui joko yhdestä tai useammasta näytepallosta. Näytteiden leikkauspinnat kapseloitiin laboratorioissa ennen kammiossa tehtäviä pintaemissiotutkimuksia. PAH-yhdistepitoisen materiaalin sijainti ja sen esiintymisen laajuus rakenteessa selvitettiin. Lisäksi tutkittujen tilojen olosuhteita, kuten ilmanvaihdon toimivuutta ja mahdollisia virhelähteitä arvioitiin; sekä mitattiin painesuhteet, lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus. Kohteista otettiin rinnakkaisnäytteitä sisäilman osalta 1–4 tilasta, joissa kyseistä materiaalia tiedettiin olevan. Tarkempan tarkasteluun on valittu kunkin tutkittavan materiaalin osalta yhden tilan analyysitulokset.

Tutkimustuloksista vertailtiin rakennusmateriaalien PAH-yhdistepitoisuuksia ja mitattuja PAH-yhdisteiden pintatuottoja tilojen sisäilmasta eri olosuhteissa mitattuihin pitoisuuksiin ja aistinvaraisesti arvioituun sisäilmanlaatuun, sekä tarkasteltiin tuloksia laskennallisesti. Tarkastelujen perusteella sisäilmapitoisuuksiin vaikuttaneita tekijöitä arvioitiin kokonaisuutena.

Lisäksi tutkimuskokonaisuudessa määritettiin erillisenä tehtävänä naftaleenin hajukynnysarvo, jota hyödynnettiin päästölaskennassa.

2.2 Tutkimuskohteet ja -materiaalit

Tutkimuskohteet 1, 3 ja 4 olivat käytössä olevia rakennuksia. Kohteessa 2 oli aloitettu peruskorjaukseen liittyviä korjaus- ja purkutöitä ja kohde 5 oli tutkimusten aikaan tyhjillään. Rakennuksen tilankäyttäjät huomioitiin tutkittavien tilojen valinnassa ja toteutettujen rakennusneuvoston sijoittelussa. Kohteisiin 2, 3 ja 5 kohdistui myös rakennussuojelumääräyksiä, jotka huomioitiin rakennusneuvoston tehtävissä. Kohteista irrotettiin erilaisia PAH-yhdistepitoisiksi tiedettyjä rakennusmateriaaleja (Materiaalit 1–6).

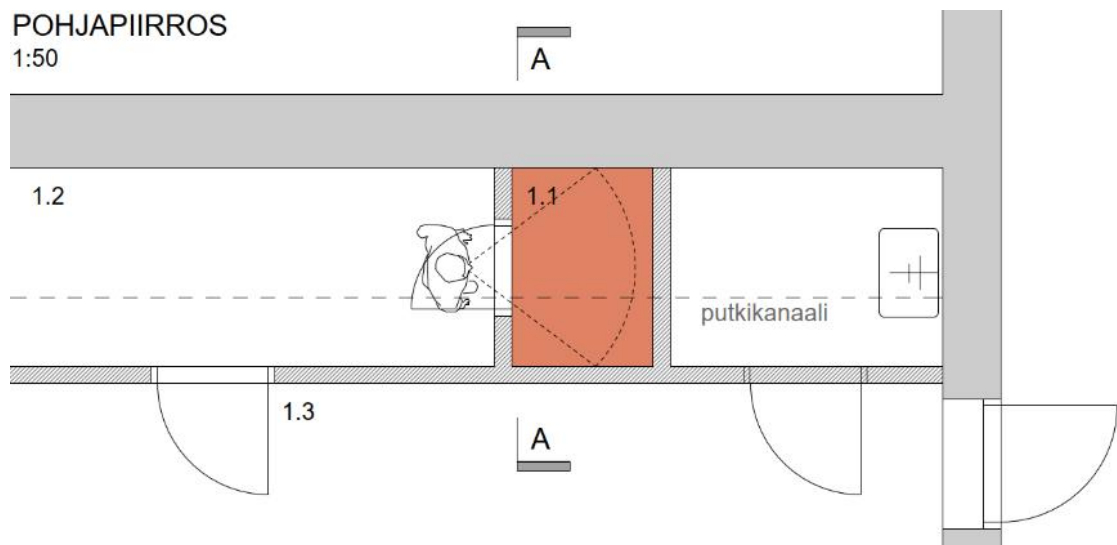
Tutkimuksen pyrittiin valitsemaan tarkasteltavaksi ensisijaisesti tiloja, joiden olosuhteet olivat mahdollisimman hyvin tavanomaisia käyttöoloja vastaavat lämpötilaltaan ja painesuhteiltaan. Materiaali- ja sisäilmapitoisuuksien tarkastelut tehtiin ensisijaisesti näistä tiloista otetuista näytteistä. Osassa kohteita oli myös tiloja, joissa olosuhteet olivat poikkeavat. Näistä kerättiin sisäilman vertailunäytteitä, joiden tulokset on esitetty erikseen.

2.2.1 Kohde 1

Kohde 1 on valmistunut vuonna 1958, ja sitä on laajennettu 1980-luvulla. Lähtötietojen (kuntotutkimukset 2021) mukaan rakennuksen kantavana runkona on teräsbetonirakenteinen pilari-palkkirunko (pitkillä sivuilla), päätyseinien kantavana rakenteena on tiilirunko. Tutkittava **Materiaali 1, tukikudoksellinen pikisively**, sijaitsi rakennuksen alapohjassa.

Tutkimukseen valittiin kellarin alkuperäisen, 1958 valmistuneen osan varastotila 1.1, jonka alueella oli todettu aiemmin tehdyissä haitta-aine- ja kuntotutkimuksissa PAH-yhdistepitoista "bitumisivelyä" alapohjarakenteessa (kuva 11). Tilassa 1.1 ei ollut ikkunoita, yksi seinistä oli maanvastainen ja muut seinät rajautuivat viereisiin lämpimiin käyttötiloihin. Tutkitun tilan 1.1 alla oli putkikanaali, jossa oli muun muassa talotekniikkaa.

POHJAPIIRROS 1:50



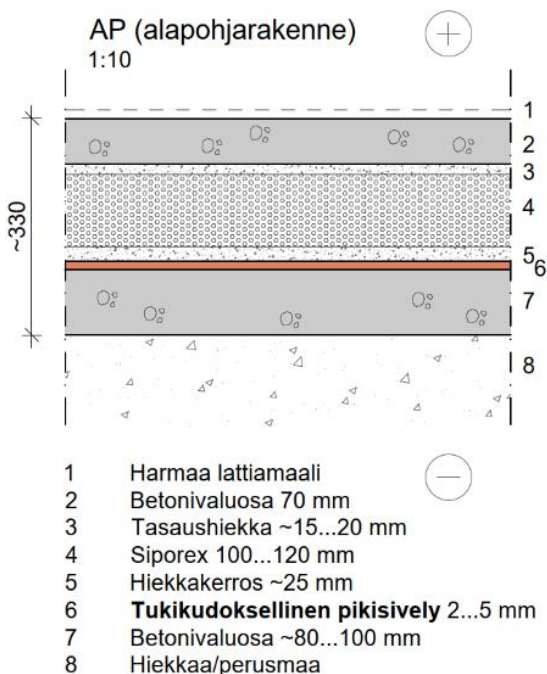
Kuva 11. Kohteen 1 tutkittu tila 1.1, PAH-yhdistepitoinen materiaali (Materiaali 1, alapohjan pikisively) on korostettu oranssilla tutkitun tilan osalta. Materiaalia oli myös ympäröivissä tiloissa, laajuus ei ole tiedossa.

Tilan 1.1 alapohjarakenteen läpi tehtiin vesijähdytteisesti $\varnothing 120$ mm timanttiporauksia maapohjaan asti (kuva 12).



Kuva 12. Kuva tilan 1.2 puolelta tilaan 1.1. Timanttioraukset ulotettiin alapohjarakenteen läpi.

Rakenneavauksen perusteella tilan 1.1 alapohjarakenne oli kuvan 13 mukainen.



Tilan 1.1 maanvastainen seinärakenne oli lähtötietojen perusteella seuraava: tasoite + tiili 90 mm - paperipäällysteinen mineraali-/lasivilla 70 mm - bitumisively - betoni. Avauksessa oli havaittu PAH-yhdisteisiin viittaavaa hajua, mutta bitumisivelyssä ei todettu kohonneita PAH-yhdistepitoisuuksia. Rakenteissa oli todettu paikallisesti mikrobikasvustoja.

Tilan 1.1 viereinen tila 1.3 rajautuu ulkoseinään ("pitkä sivu"). Ulkoseinärakenne tilassa 1.3 oli lähtötietojen mukaan seuraava (sisältä ulospäin): tasoite ja tiili 90 mm - korkkieriste 70 mm - tiili - alumiinipintainen polyuretaanieriste - koolaus - julkisivulevy. Korkkieristeessä ei todettu kohonneita PAH-yhdistepitoisuuksia.

Kuva 13. Alapohjarakenne tilassa 1.1 ja rakenteeseen tehty timanttioraus.

PAH-yhdisteiden ilmamittauksia sekä olosuhdemittauksia tehtiin tilan 1.1 lisäksi tilasta 1.3. Tila 1.3 on noin 77 m² kokoinen työskentelytila, jonka varastona tila 1.1 toimii. Tilan 1.3 alueella alapohjan betonilaatan päälle on koolattu ponttilautalattia. Tilan 1.3 alueelle ei ole tehty lattiaan rakenneavausta, eikä tilan alapohjarakenne ole kokonaisuudessaan tiedossa. On kuitenkin todennäköistä, että myös tilan 1.3 alapohjassa on käytetty vastaavaa

pikisivelyä. Koolatun lattian alla oli runsaasti likaa ja alapohja alla oli talotekniikkaa, joiden läpiviennit betoniin olivat epätiivitä.

Rakenteesta irrotetut näyteliერიöt (6 kpl) pakattiin tiukasti kaasutiiviiseen muoviin ja säilytettiin viileässä. Pikisivelymateriaalia 1 tutkittiin tarkemmin stereomikroskoopilla ja tarkastelun perusteella sively oli kolmikerroksinen, 2–5 mm paksu ja sen koostumus oli seuraava:

- Ohut pikikerros
- Kerros pikimassaa, jossa juutti- ja hampukuitua ja talkinsekaista antofylliittiasbestia noin 1 %
- Ohut pikikerros

2.2.2 Kohde 2

Alkuperäiseen tutkimusotantaan kuulunut **Kohde 2**, jossa tarkasteltavana materiaalityypinä oli ulkoseinän tervapaperi, jouduttiin jättämään pääosin pois tutkimuksesta, sillä kohde oli tutkimushetkellä kylmillään. Rakennuksen sisäilmaolosuhteita ei ollut mahdollista saada tutkimuksia varten sellaisiksi, että ne olisivat edustaneet normaalia käyttötilannetta.

Kohde 2 on vuonna 1883 valmistunut 1-kerroksinen hirsirakennus, jonka julkisivulla oli laudoituksen alla tervapahvia tuulensuojana. Kohteesta oli lämmitys ja ilmanvaihto pois päältä, minkä vuoksi rakennuksen sisälämpötila oli noin 6,5 °C ja ilmankosteus noin 58,3 %RH, vastaten pitkälti ulkoilman olosuhteita. Painesuhde ulkovaipan yli oli 0 Pa. Tutkimusten aikaan vallinneissa ”normaaliolosuhteissa” ei rakennuksessa tai tutkituissa tiloissa havaittu poikkeavaa, PAH-yhdisteisiin viittaavaa hajua. Tutkimusten aikaan rakennuksessa oli aloitettu jo purkutöitä ja joitain pintamateriaaleja oli purettu. Tutkituissa tiloissa ei oltu vielä tehty purkuja. Kohteessa tehtiin sisäilmamittaukset kahdessa tilassa. Tila 2.1 oli noin 110 m² työskentelytila. Tila 2.2 oli noin 19 m² työskentelytila. Jälkimmäisessä tehtiin vain normaali-tilanteen sisäilmamittaus.

2.2.3 Kohde 3

Kohde 3 oli kivirakenteinen, viisikerroksinen toimisto- ja liikeyrakennus, joka on rakennettu useassa vaiheessa 1800-luvun alkupuolelta alkaen. Kohteesta otettiin tutkimuksiin kaksi erilaista PAH-yhdistepitoista materiaalia: **Materiaali 2, valuasfaltti** rakennuksen kellarista ja **Materiaali 3, tervapaperi** rakennuksen viidennestä kerroksesta.

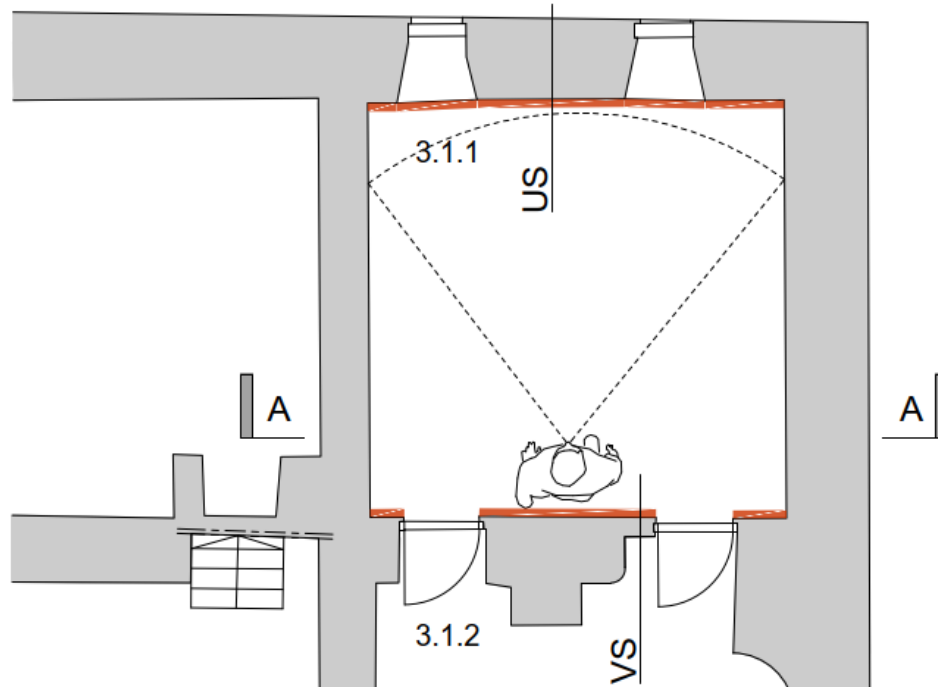
2.2.3.1 Kohde 3 / Materiaali 2

Kohteesta tutkittu **Materiaali 2, valuasfaltti** otettiin rakennuksen vanhimman osan kellarista, joka on valmistunut vuonna 1818. Kellaria on lähtötietojen perusteella laajennettu ja mahdollisesti syvennetty vuonna 1860. Valuasfaltti on arvion perusteella asennettu 1860-luvulla tehdyissä muutoksissa. Valuasfalttia oli todettu kellarin eri alueilla maanvastaisissa seinissä, väliseinissä ja alapohjarakenteessa.

Tutkimukseen valittiin kellarin varastotila 3.1.1 (kuva 14). Tilan seinistä yksi oli maanvastainen ja muut seinät rajautuivat viereisiin varastotiloihin. Tilassa ei ollut ikkunoita, katutasolle johtaneet ikkuna-aukot oli tukittu. Yksi väliseinistä oli teräsrakenteinen ja seinän toisella puolella oli toisen kiinteistön kellari. Valuasfalttia oli seinissä noin 0,5 m korkeudelle alapohjan yläpinnasta mitattuna.

POHJAPIIRROS

1:100



Kuva 14. Kohteen 3 tutkittu tila 3.1.1. PAH-yhdisteellinen materiaali (Materiaali 2, valuasfaltti) on korostettu oranssilla.

Tilassa 3.1.1 valuasfalttia oli maanvastaisessa seinässä ja osassa väliseinistä (kuva 15).



Kuva 15. Tutkittu tila 3.1.1, valuasfaltin sijainti maanvastaisella seinällä rajattu punaisella katkoviivalla. Aiempien tutkimusten jäljiltä olleet rikkonaiset pinnat paikattiin ennen hankkeen tutkimuksia.

Betonirakenteinen, eristämätön maanvarainen alapohja on uusittu myöhemmässä vaiheessa. Valuasfalttia on todennäköisesti ollut myös alapohjassa, koska siitä oli nähtävissä jäämiä teräsrakenteisen seinän alla. Kellarissa oli aiempien tutkimusten ajalta auki jääneitä rakenneavauksia ja näytteenottokohtia, jotka paikattiin ja kapselointiin ennen tutkimusten aloitusta.

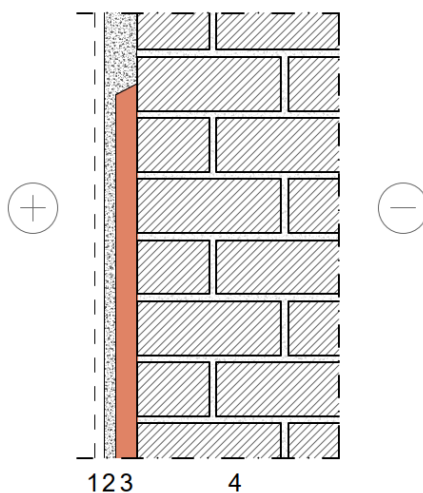
Kellarin seinästä irrotettiin vesijähdytteisesti timanttiporaamalla $\varnothing 120$ mm näyteliieriötä. Näytteenottoa ei ulotettu läpi rakenteen. Rakenteesta irrotetut näyteliieriöt (12 kpl) pakattiin ilmatiiviisiin metalliastioihin ja säilytettiin viileässä (kuva 16).



Kuva 16. Näyteliieriöiden irrotus tehtiin osastossa. Näyteliieriöt pakattiin ilmatiiviisiin metalliastioihin.

Rakenneavauksen perusteella seinärakenne oli kuvan 17 mukainen.

US/VS (seinärakenne)
1:10



- 1 Valkoinen maali
- 2 Kalkkirappaus 5...10 mm
- 3 **Valuasfaltti** 30 mm
- 4 Massiivitiilimuuraus

Kuva 17. Seinärakenteen periaateleikkaus tilassa 3.1.1 ja rakenteesta irrotettu näyteliieriö.

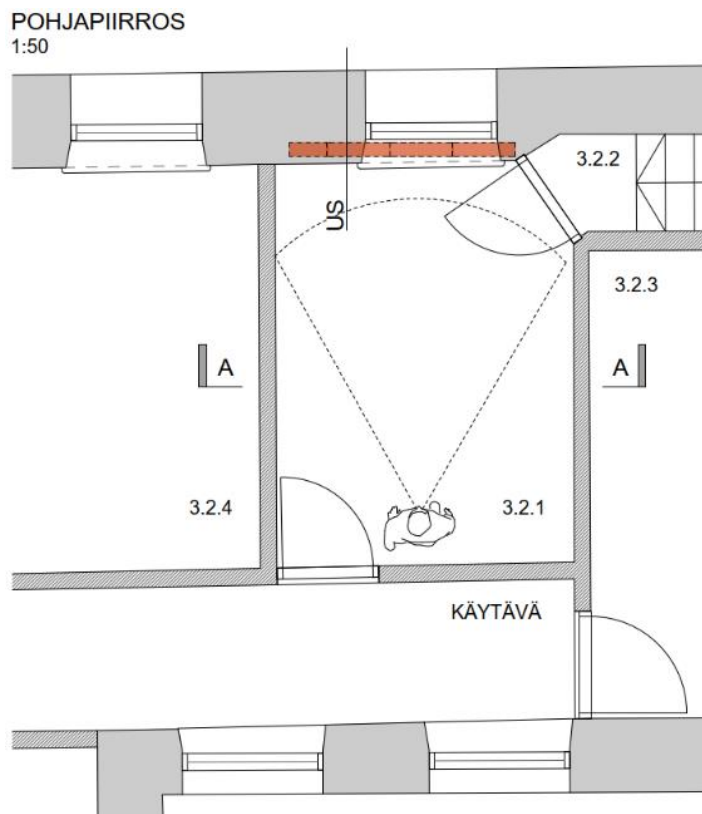
Valuasfalttimateriaalia 2 ja ulkoseinärakenteen kerroksia tutkittiin stereomikroskoopilla ja tarkastelun perusteella koostumus on seuraava sisäpinnasta lukien:

- Maalikerroksia (eri ikäisiä)
- Kalkkipohjainen rappaus (iästä ei varmaa arviota, vanha)
- Homogeeninen **valuasfaltti ~30 mm**, sisältää pikeä + luonnonhiekkaa / hienoa soraa
- Epähomogeeninen poltettu punatiili, kalkkipaakkuja sisältävä hyvin vanha muurauslaasti

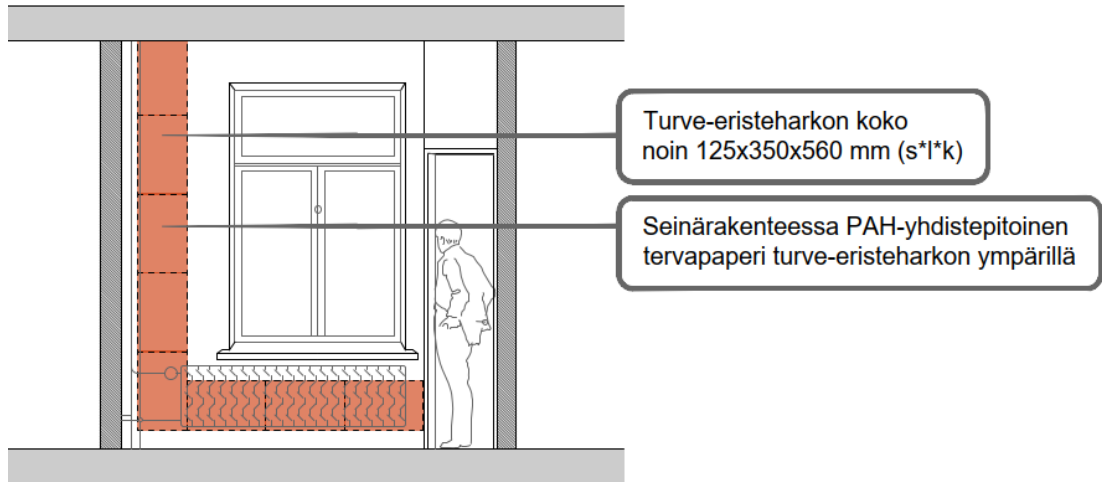
2.2.3.2 Kohde 3 / Materiaali 3

Materiaali 3, tervapaperi kerättiin rakennuksen (Kohde 3) viidennestä kerroksesta, joka on osa vuonna 1926 tehtyä laajennusta. Tervapaperia oli todettu aiemmissa tutkimuksissa 5. kerroksen ulkoseinärakenteessa.

Kohteessa todettiin tervapaperilla vuorattuja turve-eristeharkkoja paikallisesti 5. kerroksen tiilirakenteisessa ulkoseinässä rappauksen ja kuonabetonikerroksen takana. Materiaalin sijainti rakenteessa poikkesi lähtötiedoista, mistä syystä sitä jouduttiin etsimään poraamalla rakenteen sisäkuoren läpi monesta paikasta. Hankkeen näytteenotto tehtiin kopio-/toimitotarvikehuoneena toimineesta tilasta 3.2.1 (kuvat 18 ja 19). Tilassa on yksi ulkoseinä, pohjoiseen päin. Väliseinät rajautuvat viereisiin toimistotiloihin ja käytävään. Tutkitusta tilasta johtaa ovi porrashuoneeseen, tila 3.2.2. Porrashuone johtaa rakennuksen kellarista 5. kerrokseen.



Kuva 18. Kohteen 3 tutkittu tila 3.2.1. PAH-yhdistepitoinen materiaali (Materiaali 3, tervapaperi) on korostettu oranssilla.

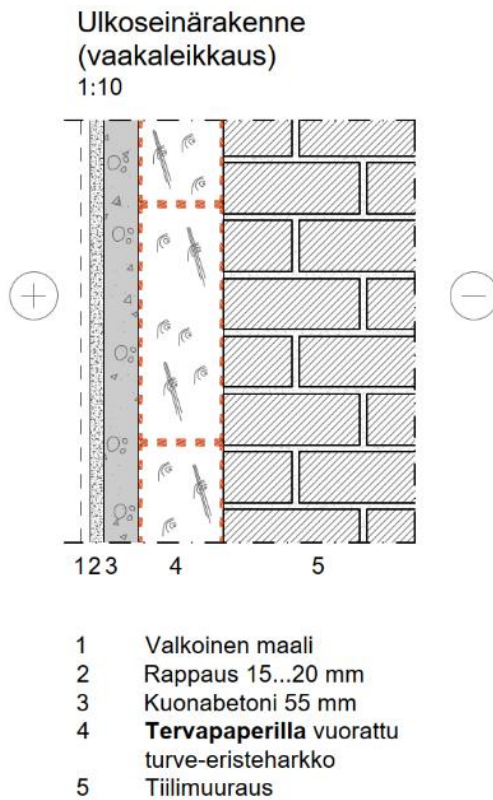
A - A
 1:50


Kuva 19. Arvio tilan 3.2.1 ulkoseinä rakenteessa olevien turveharkkojen ja PAH-yhdistepitoisen tervapaperin sijainnista (oranssi korostus).



Kuva 20. Ulkoseinä rakenteen sisällä olevien eristeharkkoja ennen ja jälkeen tervapaperin irrotuksen.

Seinä rakenne on esitetty kuvassa 21. Eristeharkot olivat todennäköisesti "Silenda" eristys- ja tätekappaleita, joita on käytetty tuote-esitteen mukaan ainakin 1920-luvulla (kuva 22). Rakenneavauksia ei ulotettu läpi rakenteen, tutkimusalueella tiilijulkisivu on rapattu ja maalattu kalkkimaalilla.



Kuva 21. Tutkitun ulkoseinärakenteen periaateleikkaus ja tervapaperilla vuorattujen harkkojen asennusperiaate.

Välikattoihin: 215 × 290 × 500 mm. Paino n. 4,8 kg.
Seiniin: 125 × 350 × 560 „ „ „ 3,8 „



Kuva 22. Eristeharkkojen asennuksen periaatepiirustus ja koko. Lähde: "Silenda" eristys- ja täytekappaleita betonirakenteita varten, Esbo Torfströ Aktiebolag, Helsinki 1920, Kauppakirjapaino.



Ulkoseinän sisäpinnan rappaus ja kuonabetoni poistettiin timanttiporaamalla ilman vettä, jotta eristeharkko tai muut orgaaniset materiaalit eivät kasvaisi. Irrotetut tervapaperin palat pakattiin alumiinifolioon ja säilytettiin viileässä (kuva 23). Paperin leikkauspinnat kapselointiin laboratoriossa ennen kammiomittauksia. Riittävän (ehjän) näytepinta-alan saavuttamiseksi paperin molemmat pinnat laskeettiin emittoivaksi alaksi kammiossa.

Kuva 23. Ulkoseinän harkkoeristeiden pinnalta irrotettuja tervapapereita pakattuna alumiinifolioon.

Tervapaperia ja harkon eristemateriaalia tarkasteltiin stereomikroskoopilla. Tehdyn tarkastelun perusteella läpikyllästetty tervapaperi oli noin 0,4 mm paksua. Eristeharkko koostui kuivasta sammaleesta ja turpeesta, tervapaperi oli taiteltu harkon ympärille ja kiinnitetty metallisella paperiliittimellä. Kuonabetoni sisälsi liuskeista koksikuonaa ja hiiltä, sisäpinnan rappaus koostui harvasta ja löyhästä laastista, jossa oli vähän hiekkaa, seassa oli lisäksi hiukan koksikuonan paloja ja jouhia.

Tilaan aiemmissa kuntotutkimuksissa vuonna 2018 tehdyn rakenneavauksen mukaan välipohjarakenne oli tilan 3.2.1 alueella (lähellä porrashuoneen ovea) seuraava:

- linoleumimatto
- lastulevy 12 mm
- aaltopahvi
- ponttilauta noin 36 mm
- lattiakoolaus noin 50 mm
- täyttökerros (avausta ei jatkettu)

Kuntotutkimuksissa välipohjan rakenneavauksessa ei todettu poikkeavaa hajua, PAH-yhdisteitä sisältäviä materiaaleja eikä ilmapvirtausta huonetilaan. Tervapaperia sisältäneeseen ulkoseinään tehdyssä rakenneavauksessa oli todettu "bitumin" hajua. Kuntotutkimusten aikana porrashuoneessa oli havaittu "öljymäistä" hajua.

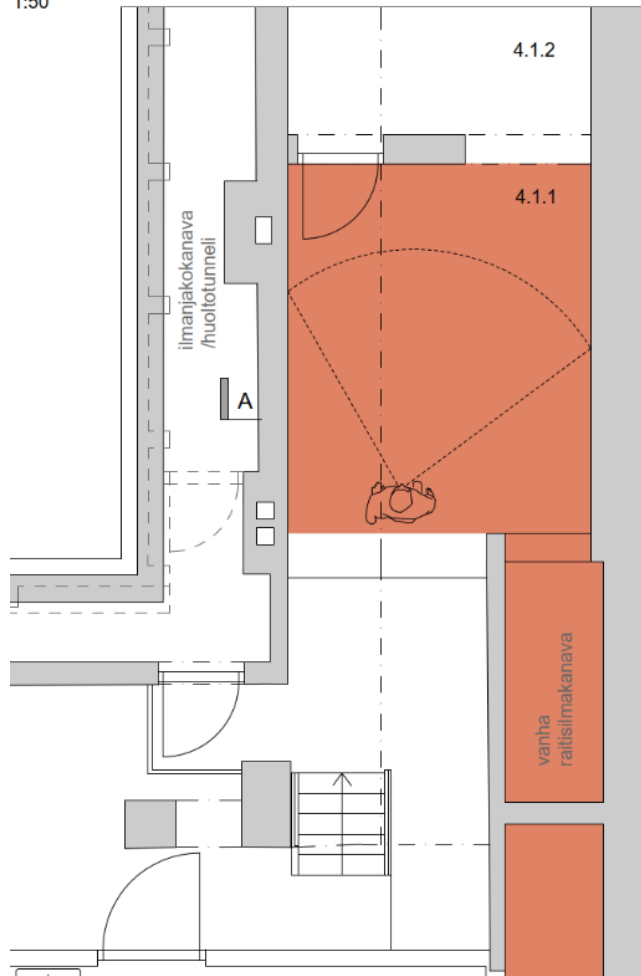
2.2.4 Kohde 4

Kohde 4 oli valmistunut vuonna 1929. Rakennuksen ulkoseinät ovat massiivitiiltä, osa pilareista on massiivitiiltä ja osa teräsbetonia, julkisivut on rapattu. Välipohjat ovat pääosin betonisia kaksoislaattapalkistoja.

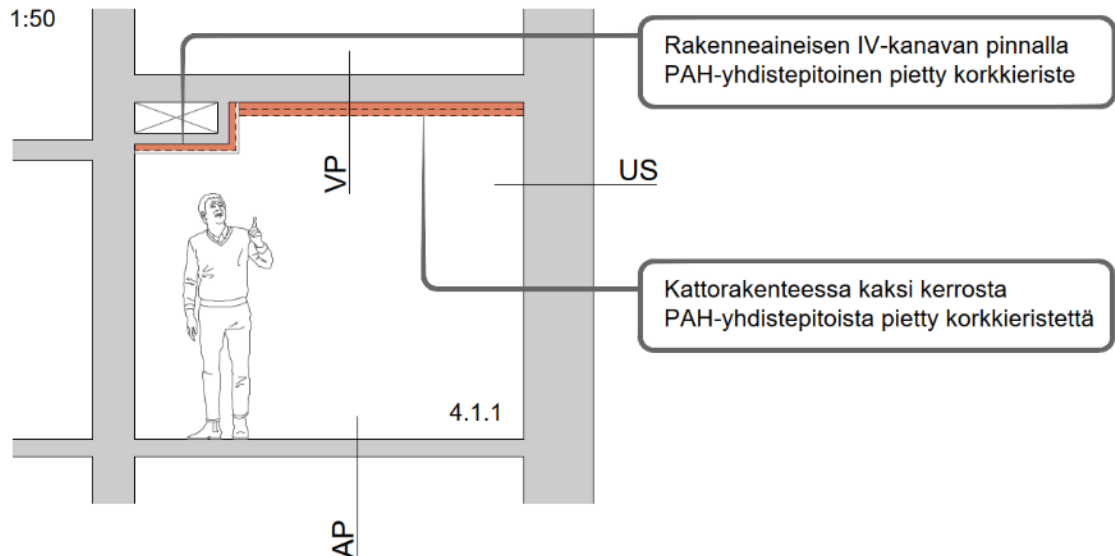
Kohteesta 4 otettiin tutkimukseen kaksi näyttemateriaalia, **Materiaali 4, korkieriste** ja **Materiaali 5, bitumiliima**. Tutkimukset tehtiin kohteen kellarikerroksessa ja 4. kerroksessa.

2.2.4.1 Kohde 4 / Materiaali 4

Tutkittavaksi tilaksi valikoitui tekninen tila 4.1.1 kellarissa (kuva 24). Kellarissa ja tutkitussa tilassa ei ollut ikkunoita. **Materiaalia 4, pietty korkieriste** on käytetty kattopinnoilla, paikoin useita kerroksia (kuva 25).

POHJAPIIRROS
 1:50


Kuva 24. Tutkittu tila 4.1.1 sijaitsi rakennuksen kellarissa. Korkkieristettä oli käytetty nykyisen teknisen tilan katossa. Kuvaan on merkitty oranssilla värillä eristeen esiintymisalue.

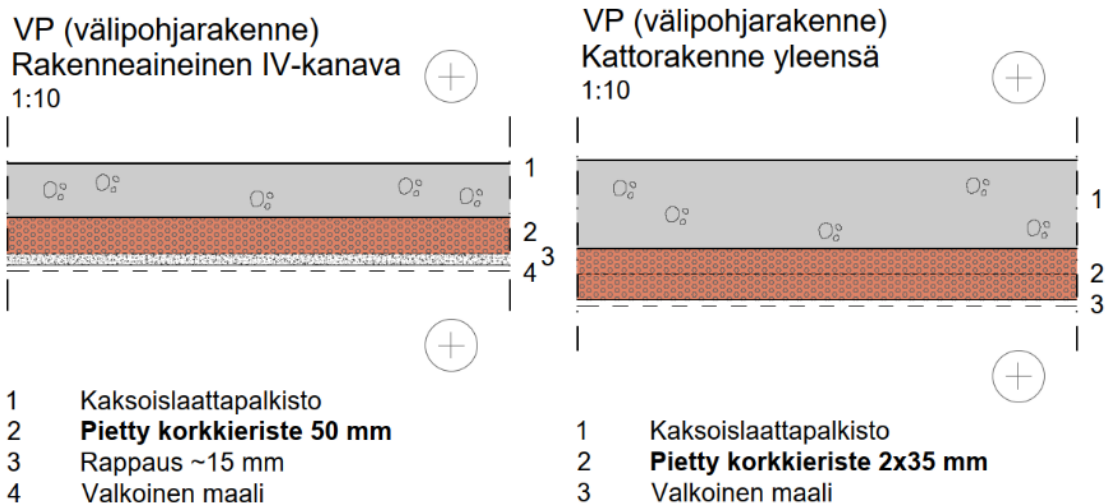
A - A
 1:50


Kuva 25. Periaatteellinen poikkileikkaus tutkitusta tilasta 4.1.1.

Tila 4.1.1 on osa suurempaa yhtenäistä kellaritilaa, ja se on aiemmin palvellut ilmalämmitysjärjestelmän tuloilmakammiona, jossa rakennuksen ylempiin kerroksiin johdettu ilma on lämmitetty. Lämmitysjärjestelmä on sittemmin poistettu käytöstä. Yksi tilan 4.1.1 seinistä rajautuu naapurikiinteistöön ja yksi väliseinä rajautuu toiminnassa olevaan huoltotunneliin / ilmanjakokanavaan, muutoin tila on auki kellarin muihin tiloihin.

Kattopinnan korkkieristeet olivat osin pinnaltaan rapattuja ja osin vain maalattuja. Eristettä oli myös ympäröivissä tiloissa, jotka ovat olleet vanhan ilmalämmitysjärjestelmän osia, esimerkiksi tilaan 4.1.1 johtavassa vanhassa suuressa tuloilmakanavassa (kuva 26). Kohteessa on haitta-aine- ja kuntotutkimusten perusteella (2022) käytetty vastaavaa korkkieristettä myös yläpohjatiloiissa, saunan ulkoseinän eristeenä ja hormien läpiviennissä.

Materiaali 4, pietty korkkieriste, irrotettiin tilan katosta rakenneaineisen ilmanvaihtokanavan pinnalta (kuvat 26–28). Rakenneavausten ja havaintojen perusteella korkkilevyjä sisältäneet rakenteet olivat seuraavat:



Kuva 26. Korkkieristettä sisältäneet rakenteet tutkitussa tilassa 4.1.1, korkkilevy korostettu oranssilla.

Näytteenottoa varten tilan 4.1.1 alueelle tehtiin erillinen osasto (kuva 27). Irrotetut korkkilevyn palat pakattiin tiiviisiin metallilaatikoihin ja säilytettiin viileässä.



Kuva 27. Vasemmalla: Korkkilevy irrotettiin rakenneaineisen, rapatun IV-kanavan pinnalta (katkoviiva). Oikealla: Näytteenottoalue osastoituna ja paikattu alue IV-kanavassa.



Kuva 28. Vasemmalla: Korkkilevyä oli kattopinnalla useita kerroksia. Korkkilevyn palat pakattiin metallilaatikoihin ja säilytettiin viileässä.

Korkkilevyä tutkittiin tarkemmin stereomikroskoopilla. Tarkastelun perusteella korkkieriste koostuu "raemaisista" korkkipaloista, jotka ovat sisältä puhtaita (= puhdasta korkkia, ei piikettä (kuva 28)). "Korkkirakeet" on sidottu toisiinsa pikimassalla. Havaintojen perusteella

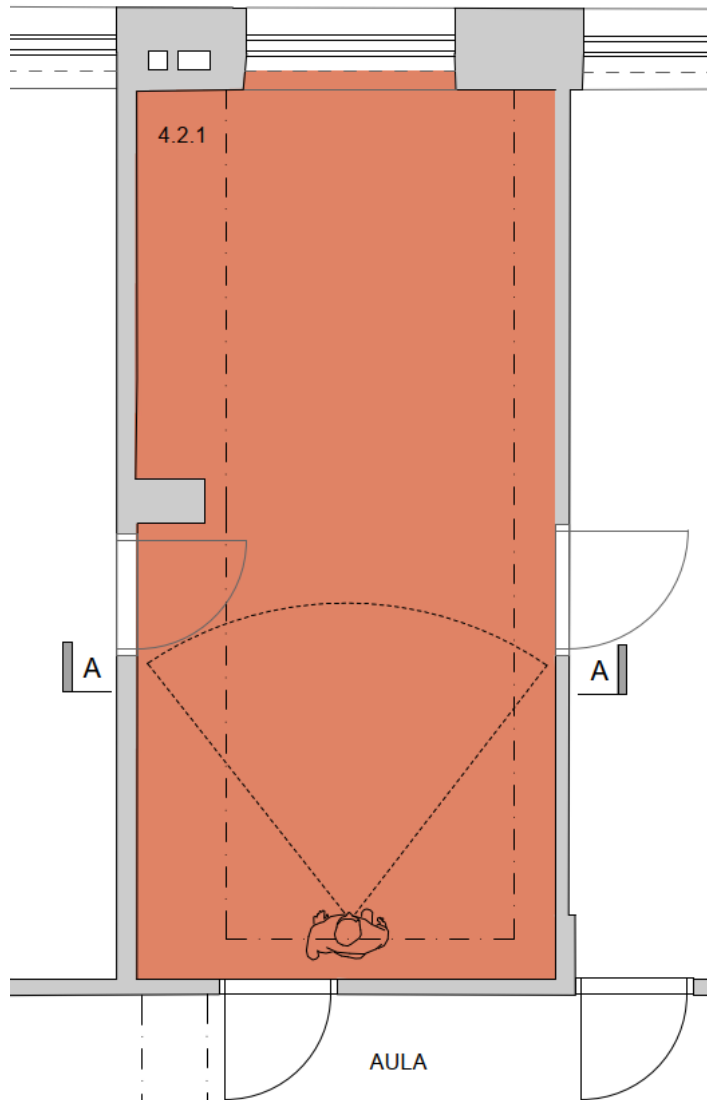
irtonaista hienojakoista korkkia on sekoitettu pikimassan kanssa ja massa on valettu / puristettu levymäisiin muotteihin.

2.2.4.2 Kohde 4 / Materiaali 5

Vuonna 1929 valmistuneesta kohteesta 4 otettiin tutkimuksiin sauvaparkettien kiinnittämiseen käytettyä **bitumiliimaa, Materiaali 5**. Kohteessa 2022 tehdyissä haitta-aine- ja kuntotutkimuksissa oli todettu parketin alla kyseistä bitumiliimaa useissa, pääosin toimistokäytössä olevissa tiloissa. Tutkimuksiin valittiin 4. kerroksen tila 4.2.1. Sisäilmanäytteenottoa tehtiin myös 3. kerroksen neuvotteluhuoneesta 4.2.2, jonka olosuhteiden todettiin kuitenkin olevan poikkeuksellisen alipaineisia (~ -30 Pa). Näytteiden irrotus tehtiin 3. kerroksen ikkunattomasta varastotilasta 4.2.3, jossa oli käytetty vastaavaa bitumiliimaa, koska suurien näytepalojen irrotus ei ollut mahdollista käytössä olevista toimistotiloista.

Tutkimuksiin valitussa tilassa 4.2.1 oli yksi, luoteeseen päin oleva ulkoseinä. Muut seinät rajautuivat viereisiin toimistotiloihin ja aulaan. Tilan 4.2.1 ja viereisten toimistohuoneiden välillä oli väliovet. Välipohja on kaksoislaattapalkistorakenteinen. Välipohjan ontelotilassa ei ole täyttöä, mutta muottilaudat on jätetty välipohjan sisään. Ontelotilasta oli todettu vaihtelevasti ilmavirtaus huonetilaan tai rakenteeseen päin.

Tutkitulla alueella 4. kerroksessa on aiemmin sijainnut ravintola ja tila 4.2.1 on aiemmin ollut kahden kerroksen korkuinen. Ylempään (5.) kerrokseen on rakennettu uusi betonirakenteinen välipohja 50-luvulla, jolloin tilat on muutettu toimistokäyttöön (kuva 29). Muutoksen yhteydessä on muun muassa peitetty kerrosten välisiä ikkunoita levytyksellä (maalattu kovalevy) ja mineraalivillalla. Vuonna 2022 kuntotutkimusten yhteydessä tehtyjen rakeneavausten perusteella kerrosten välillä voi kulkeutua ilmaa ja epäpuhtauksia erityisesti tilan ollessa alipaineinen. Tilaan 4.2.1 rajautuvissa rakenteissa on myös mahdollisia vanhoja (savu)hormeja.

POHJAPIIRROS
 1:50


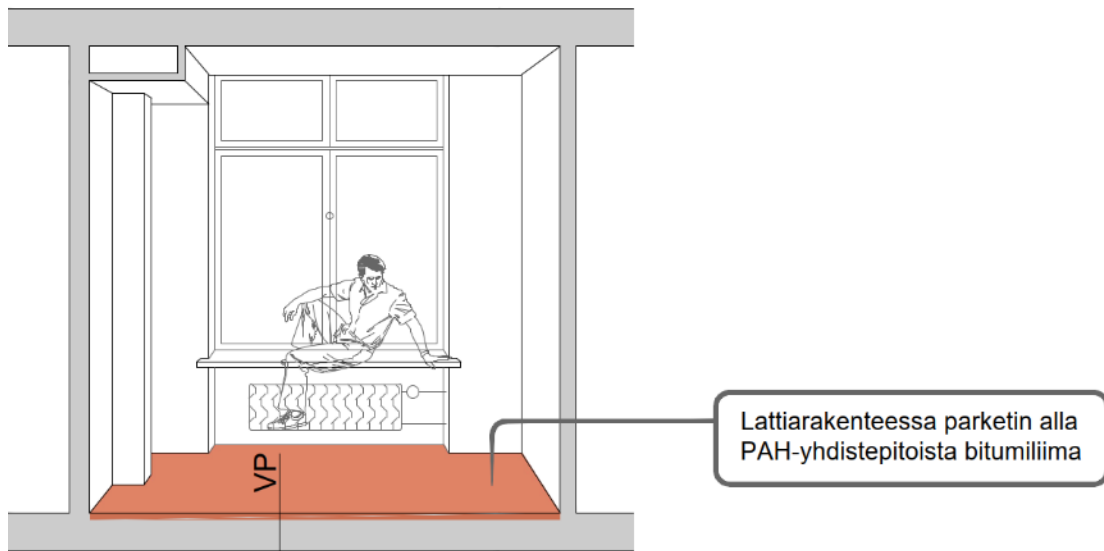
Kuva 29. Tutkimuksiin valittu tila 4.2.1, bitumiliimaa sisältänyt alue tilassa on korostettu oranssilla. Vastaavaa bitumiliimaa oli myös ympäröivissä tiloissa.

Tilassa 4.2.1 oli bitumiliimaa parketin alla koko huoneen alalla (kuvat 30–31). bitumiliimaa oli myös viereisten toimistotilojen ja aulan alueella.



Kuva 30. Sauvaparketti on kiinnitetty alustaan bitumiliimalla. Tutkitun tilan 4.2.1 ja ylemmän kerroksen välille on tehty myöhemmin uusi välipohja ja kerrosten välille, ulkoseinälinjalle on tehty levytyksiä (katkoviiva), joiden taakse on jätetty vanhoja ikkunoita.

A - A
1:50

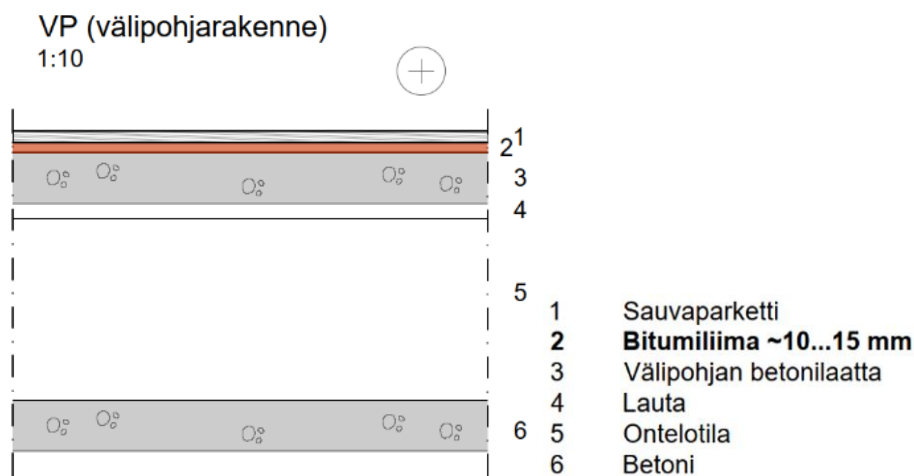


Kuva 31. Periaatteellinen poikkileikkaus tilasta 4.2.1.

Sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksien mittaaminen normaalitilanteessa ja alipaineessa tehtiin tilan 4.2.1 lisäksi 3. kerroksessa sijainneeseen tilaan 4.2.2. Tila 4.2.2 oli noin 30 m² neuvotteluhuone, jossa oli yksi ikkunallinen ulkoseinä, bitumiliimaa oli sauvaparketin alla koko huoneen alalla. Tilasta oli yhteys WC-tilaan ja pieneen keittiötilaan, WC:ssä oli poistoilmaventtiili. Tilaan 4.2.2 tehtiin sisäilmamittaus tilan "normaaliolosuhteissa" ja koneellisen tulo-poistoilmavaihdon ollessa pois päältä. Normaalitilanteessa tilan olosuhteet olivat poikkeukselliset. Tila oli ilmanvaihdon toiminnan takia noin 30 Pa alipainen, erillinen tulo-poistoilmakone vieressä tilassa oli täydellä teholla, eikä se ollut säädettävissä. Tilan 4.2.2 lämpötila oli

20,5 °C ja ilmankosteus 32,9 %RH, parkettipinnan lämpötila oli 17,5...20,5 °C. Tilassa havaittiin "normaalitilanteessa" PAH-yhdisteisiin viittaavia lehahtuksia ikkunaseinällä lämmityspattereiden vieressä. Alipaineistuksen tulokset kuvaavat tilannetta, jossa tilan ilmanvaihto on laitettu kokonaan pois päältä, tila oli tällöin noin 3–12 Pa alipainen rakenteen yli. Myös ilmanvaihdon ollessa pois päältä oli paikoin havaittavissa hetkellisiä PAH-yhdisteisiin viittaavia lehahtuksia.

Rakenneavausten aikainen sisäilmamittaus tehtiin 3. kerroksen varastotilaan 4.2.3, josta materiaalinäytteet irrotettiin. Tutkimuksissa tilan 4.2.3 välipohjasta irrotettiin vesijäähdytteisesti 8 kpl ø120 mm kokoisia näyteliäriöitä. Rakenneavausten perusteella välipohjan pintarakenne oli (tiloissa 4.2.3 sekä 4.2.1) kuvan 32 mukainen.



Kuva 32. Rakenneavauksen perusteella määritetty välipohjarakenne tilassa 4.2.3.

Näytteenotto ulotettiin ontelotilaan saakka. Rakenteesta irrotetut näyteliäriöt pakattiin tiiviisiin metalliastioihin osaston sisällä ja säilytettiin viileässä. Parketin alla ollut 10–15 mm bitumiliimakerros ei ollut yhtenäinen, joissain kohti massaa ei ollut lainkaan (kuva 33). Näyteliäriöt pyrittiin ensin ottamaan siten, että parketti pysyisi kiinni massassa. Massan ja parketin välinen tartunta oli kuitenkin heikko ja parkettia poistettiin hallitusti, riittäväällä laajuudella ennen näyteliäriöiden irrottamista (kuva 33).



Kuva 33. Bitumiliimakerros ei ollut yhtenäinen parketin alla. Parkettia poistettiin ennen näyteliäriöiden irrotusta.

Noin 10–15 mm paksua bitumiliimaa tutkittiin tarkemmin stereomikroskoopilla ja tarkastelun perusteella massan koostumus on seuraava:

- Hienorakeinen valuasfaltti, jossa on bitumimaista mustaa sideainetta ja hiekkaa

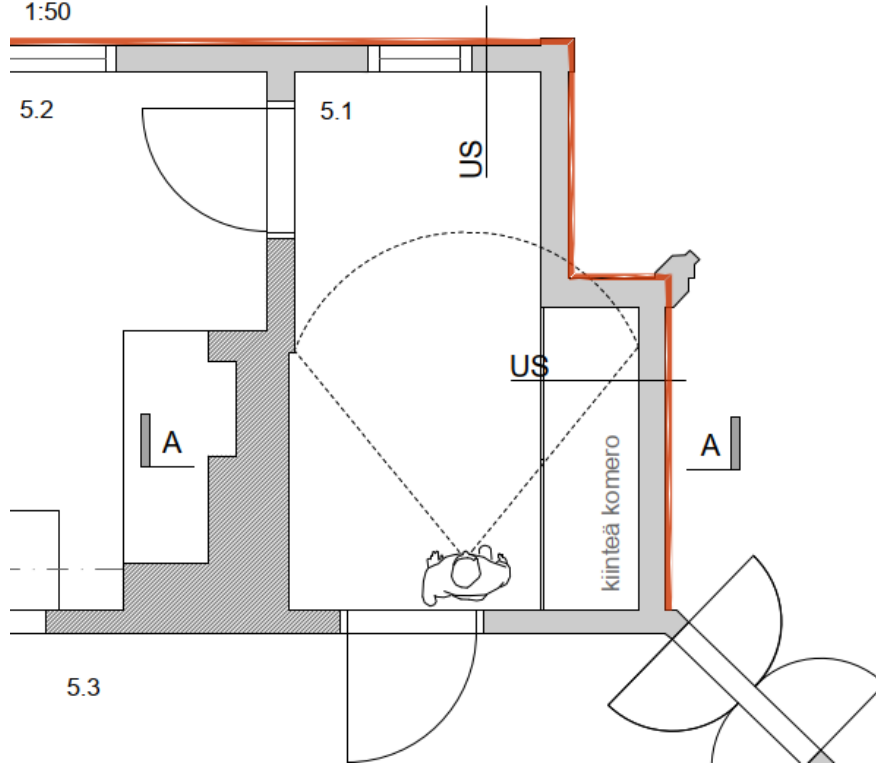
2.2.5 Kohde 5

Kohde 5 oli vuonna 1877 valmistunut pystyhirsirakenteinen vapaa-ajan asuinrakennus. Rakennuksessa on kaksi kerrosta ja alapohjan alla noin 300 mm...1 500 mm ryömintätila. Julkisivuilla on vaakalaudoitus ja sisäseinissä on maalatut pahvit. Julkisivulla, vaakalaudoituksen alla, on tuulensuojana toiminut PAH-yhdistepitoinen **tervapahvi, Materiaali 6**. Alapohja on puurakenteinen ns. rossipohja, ja väli- ja yläpohjat ovat niin ikään puurakenteisia. Alaja välipohjien täyttönä on hiekkaa ja sammalta. Rakennus on suojeltu. Ennen tutkimuksia rakennus oli ollut peruslämmöllä ja ilman käyttöä noin 10 vuotta.

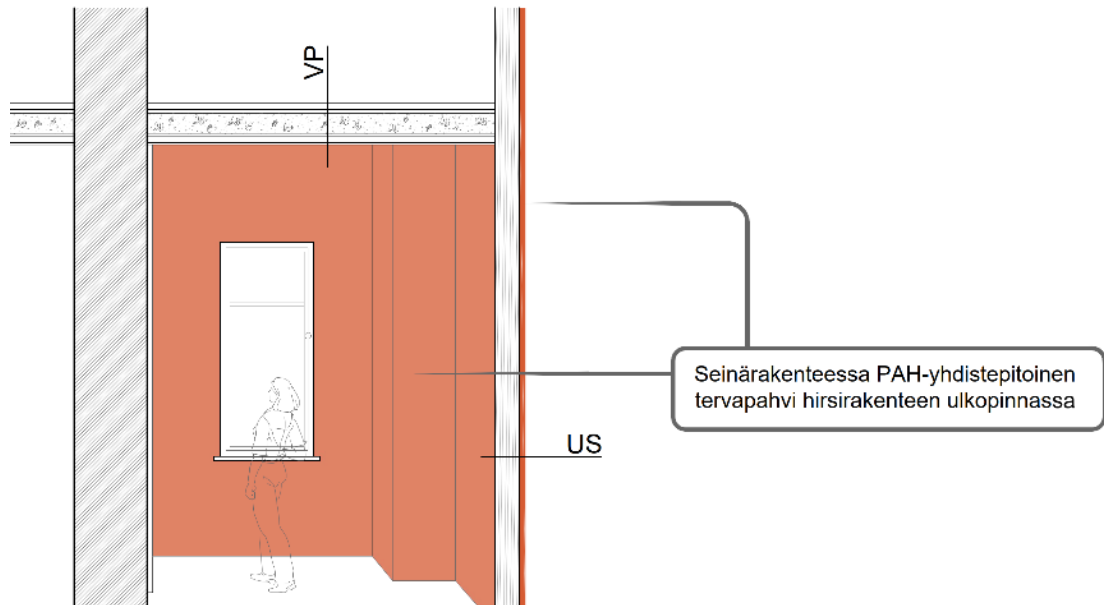
Rakennuksessa on tehty kunto- ja haitta-ainetutkimuksia vuonna 2022. Tutkimusten perusteella PAH-yhdistepitoisesta tervapahvista on imeytynyt PAH-yhdisteitä myös hirsiseinien ulkopintaan ja riveeseen, suurimmat pitoisuudet olivat ulkopinnassa. Julkisivun tervapahvin lisäksi rakennuksessa oli todettu myös muita PAH-yhdistepitoisia materiaaleja; rakennuksen ullakolla oli todettu korkeita PAH(16)-yhdistepitoisuuksia sisältäviä purettuja kermin paloja ja pikimaalia piipun läpiviennin pellityksessä. Materiaaleissa oli todettu myös korkeita haihtuvien PAH-yhdisteiden pitoisuuksia, ja ne aiheuttivat ullakotilaan erittäin voimakkaita hajuja. Tutkimuksen aikana normaaliolosuhteissa tehtyjen paine-eromittauksien ja merkkisavukokeiden perusteella ilmavirtaus oli käyttötiloista ylös ullakon suuntaan, merkittävää ilmaa ullakolta sisätiloihin ei todettu. Alipaineistuksen aikana ullakon PAH-yhdistepitoisilla materiaaleilla on voinut olla (vähäistä) vaikutusta yläkerran tiloista tehtyihin mittaustuloksiin. Ala- ja välipohjarakenteissa ei havaittu korkeita PAH-yhdistepitoisuuksia sisältäviä materiaaleja. Rakenteiden sisällä voi aiempien tutkimusten perusteella olla paikoin vanhoja sähköjohtoja, joiden eristeet voivat sisältää PAH-yhdisteitä. Ullakkoa lukuun ottamatta muilla mahdollisilla PAH-yhdisteiden lähteillä ei arvioitu olleen merkittävää vaikutusta tutkimuksen tuloksiin.

Hankkeen tutkimukseen valittiin 1. kerroksen keittiön yhteydessä ollut varasto-/käytävätila 5.1. Tilan ulkoseinät suuntautuivat länteen ja pohjoiseen, ikkunaseinä oli pohjoiseen päin (kuvat 34 ja 35). Muut seinät rajautuivat keittiötilaan ja oleskelutilaan. Vertailevia ilmanäytteenottoja tehtiin myös yläkerran tiloista 5.4 ja 5.5. Tila 5.4 on yläkerrassa sijainnut noin 1,5 m² komero, jonka ulkoseinät olivat etelään ja itään. Tilassa ei ollut ikkunoita, ulkoseinäpintaa oli noin puolet seinäpinta-alasta. Muut seinäpinnat rajautuivat suureen huonetilaan, jonka yhteyteen komero oli rakennettu. Tilan seinäpinnalla oli noin 1 m² alue, jolta puutui pinkopahvi ja hirsipinta oli näkyvillä. Tila 5.5 oli yläkerrassa sijainnut noin 6 m² varastohuone, sen ulkoseinät olivat itään (ikkunaseinä) ja pohjoiseen. Varastohuoneessa oli ulkoseinällä kiinteä komero, jonka taustalla oli pinkopahvissa vaurioita.

Kohteessa tehtiin hankkeen tutkimusten lisäksi erillisiä sisäilman PAH-yhdisteiden mittauksia heinäkuun lopussa 2022. Kesän tutkimuksissa mitattiin tiloista 5.1, 5.4 ja 5.5 normaaliolosuhteissa sisäilman kaasumaiset sekä hiukkasiin sitoutuneet PAH-yhdisteet.

POHJAPIIRROS
 1:50


Kuva 34. Tutkimuksiin valittu tila 5.1, julkisivun tervapahvi on korostettu oranssilla.
 A - A
 1:50

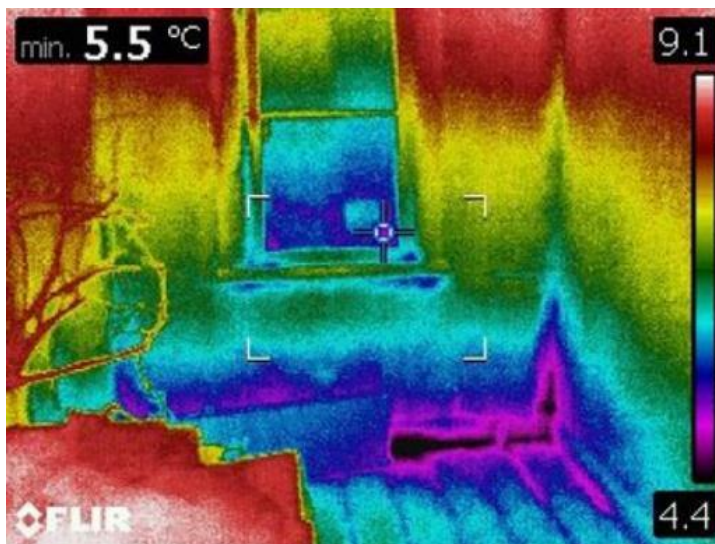


Kuva 35. Periaatteellinen poikkileikkaus tilasta 5.1, tervapahvia on ulkoseinien alueella hirsirungon ulkopinnalla.

Aiempien kuntotutkimusten perusteella rakennuksen ilmatiiveys oli heikko, niin ulkoseinien kuin ala- ja välipohjien osalta (kuva 36).



Kuva 36. Tilan 5.1 ulkoseinään tehty rakenneavaus, pystyhirsien välit on tiivistetty riveellä.



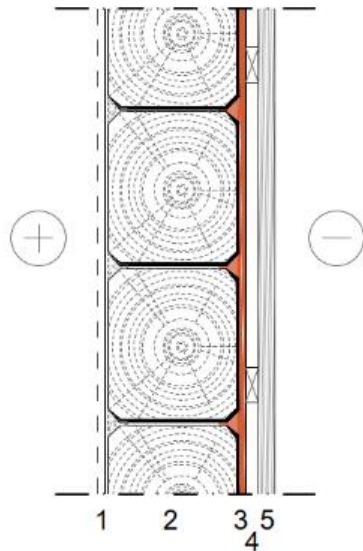
Koska rakennuksessa ei ole hallittuja korvausilmareittejä, tuli korvausilmaa rakenteiden epätiiveyskohtien kautta. Ryömintätilasta todettiin ilmayhteys sisätiloihin epätiiviiin alapohjan läpi.

Hirsiulkoseinien ja alapohjan liittymät olivat lämpökamerakuvan perusteella hyvin epätiiviiit (kuva 37). Tiiviyspuutteen vuoksi korvausilmaa virtasi ajoittain sisään myös hirsiseinien kautta.

Kuva 37. Lämpökamerakuvan perusteella ulkoseinän ja alapohjan liittymä on epätiivii (kuntotutkimukset 2022, tila 5.1).

Konservaattorin tekemästä noin 200 mm x 200 mm rakenneavauksesta varmistettiin ulkoseinärakenne ja, että tervapahvia on tilan 5.1 alueella (kuva 38).

Ulkoseinärakenne
(vaakaleikkaus)
1:10



- 1 Tapetti, pahvi/kovalevy
- 2 Pystyhirsi, tiivistetty pellavariveellä
- 3 **Tervapahvi**
- 4 Rimoitus
- 5 Vaakapanelointi

Kuva 38. Pystyhirsirakenteisen ulkoseinärakenteen vaakaleikkaus. Tilan 5.1. kohdalle julkisivulla tehty pieni rakenneavaus.

Rakennusmateriaalinäyte (Materiaali 6) otettiin rakennuksen itäpuolen julkisivulta konservaattorin tekemästä ja suojaamasta noin 1500 mm x 500 mm rakenneavauksesta.



Julkisivulta irrotettu noin 1–1,5 m² pala tervapaperia taiteltiin kevyesti, käärittiin alumiinifolioon ja säilytettiin viileässä (kuva 39).

Tervapahvia tutkittiin tarkemmin stereomikroskoopilla ja tarkastelun perusteella tervapahvi on noin 1,2–1,4 mm paksu ja terva/piki on imeytetty pahviin. Pystyhirsien välissä käytetty rive/tilke oli pitkää orgaanista kuitua, jonka seassa oli pieniä puun paloja. Kuitua ei ollut kyllästetty, mutta sen pinta oli tummunut kohdista, jotka olivat kiinni tervapahvissa.

Kuva 39. Tervapahvi suojattiin alumiinifoliolla ja reunat teipattiin tiiviisti alumiiniteipillä.

2.2.6 Yhteenveto tiloista ja materiaaleista

Taulukoissa 6 (massamaiset materiaalit) ja 7 (huokoiset materiaalit) on esitetty tutkittujen PAH-yhdistepitoisten materiaalien pinta-alat tutkituissa tiloissa sekä tila- ja materiaalikohdattaiset tiedot ja muita huomioita. Ks. myös kohta 2.4.1. *Rakennusmateriaalien irrotus ja käsittely.*

Taulukko 6. PAH-yhdistepitoisten massamaisten materiaalien pinta-alat tutkituissa tiloissa ja muita huomioita.

Kohde, tila, materiaali	Kohde 1, tila 1.1, materiaali 1, pikisively	Kohde 3, tila 3.1.1, materiaali 2, valuasfaltti	Kohde 4, tila 4.2.1, materiaali 5, bitumiliima
Tilan tilavuus [m ³]	3,97	55	71,6
PAH-pitoisen materiaalin pinta-ala [m ²]	1,46	7,6	23
Rakenne, jossa PAH-yhdisteitä sisältävää materiaalia on käytetty	AP (alapohja), kaksoislaatta	KS (kellarin seinä) massiivitiilimuuraus	VP (välipohja) kaksoislaattapalkisto, lattiapinta)
PAH-pitoisen materiaalin paksuus [mm]	10	~25-35	~10-15
PAH-pitoista materiaalia ja sisätilaa rajaavan kerroksen paksuus [mm]	165...175	maali ~1 maali + rappaus 5-20	12
PAH-pitoista materiaalia ja sisätilaa rajaavan materiaalikerrokset (sisäpinnasta lukiin)	Maali (orgaaninen) - betoni 40-50 mm - hiekka 10 mm - kevytbetoni 100 mm - hiekka 15 mm - pikisively	Valuasfaltin pinta maalattu orgaanisella maalilla tai kalkkirapattu ja maalattu	Sauvaparketti (lakattu tammi)
Muita huomiota	Putkikanaalin kohdalla pikisivelyn laajuus ei ole varmuudella tiedossa. Sisäilmanäytteitä kerättiin vertailuksi myös tilasta 1.3.	Valuasfalttia on todettu seinien alaosissa, voi olla myös muualla. Alapohja uusittu, reunoille mahdollisesti jäänyt valuasfalttia (havaittu yhden seinän alla).	Bitumiliiman paksuus oli vaihteleva yleensä noin 10-15 mm, mutta levitys epätasainen ja joissain kohti liimaa ei ollut lainkaan. Sisäilmanäytteitä kerättiin vertailuksi myös tilasta 4.2.2.

Taulukko 7. PAH-yhdistepitoisten huokoisten materiaalien pinta-alat tutkituissa tiloissa ja muita huomioita.

Kohde, tila, materiaali	Kohde 3, tila 3.2.1, materiaali 3, tervapaperi	Kohde 4, tila 4.1.1, materiaali 4, korkkilevy	Kohde 5, tila 5.1, materiaali 6, tervapahvi
Tilan tilavuus [m ³]	27,6	22,8*	27,7
PAH-pitoisen materiaalin pinta-ala [m ²]	2*	11,5*	18,7
Rakenne, jossa PAH-yhdisteitä sisältävää materiaalia on käytetty	US, betoni -eriste - tiilimuuraus	VP, kaksoislaattapalkisto (kattopinta)	US, pystyhirsirunko
PAH-pitoisen materiaalin paksuus [mm]	0,4	35...70 (1-3 levyä)	1,2...1,4
PAH-pitoista materiaalia ja sisätilaa rajaavan kerroksen paksuus [mm]	70-75	1...15	160...170
PAH-pitoista materiaalia ja sisätilaa rajaavan materiaalikerrokset (sisäpinnasta lukiin)	Maali (orgaaninen)- rappaus 15-20 mm - kuonabetoni 55 mm, rappaussessa voimakasta halkeilua, kuonabetoni huokoista, epähomogeenista.	Maali (orgaaninen) ja osin rappaus noin 15 mm rakenneaineisen IV-kanavan alueella.	Maali (orgaaninen/ liima-maali) - kovalevy - maalattu (liimamaali)/tape-toitu pinkopahvi 5-10 mm - pystyhirsi ja pellavarive 150 mm - tervapahvi
Muita huomiota	Rakenteessa olevan tervapaperin määrä arvio. Tervapaperi on kääritty harkkojen ympärille, joten kokonaisala suurempi.	*Tila 010 on auki muihin kellaritiloihin, arvio alueesta, jonka tutkimus käsittää (tila 010 ja 011 yhteensä ~52,2 m ³). Korkkieristettä katossa noin 11,5 m ² alueella, josta 4,6 m ² alue rapattu.	Noin 5-8 m ² tervapaperia sisältävästä seinäpinta-alasta rajaa kiinteä puinen kaapisto. Sisäilmanäytteitä kerättiin vertailuksi myös tiloista 5.4 ja 5.5.

Tutkimuskohteissa PAH-yhdistepitoisen rakennusmateriaalin ja sisäilman välissä olevan materiaalin paksuus ja materiaali vaihtelivat ohuesta rappaus- ja maalikerroksesta ohuehkoon betonilaattaan ja huokosiin epäorgaanisiin materiaalikerrokseen. Rajaavat kerrokset eivät pääosin olleet erityisen ilma- ja kaasutiiviitä.

2.3 Sisäilmaolosuhteiden ja muiden taustatekijöiden mittaukset

2.3.1 Sisäilman laadun aistinvarainen arviointi

Sisäilmanlaatua ja hajukynnyksen ylittymistä arvioitiin tutkimuksen yhteydessä tilan normaaleissa käyttöolosuhteissa, noin 10...15 Pa alipaineessa (alipaineistusta purettaessa) ja rakenneavausten aikana osaston sisältä tai materiaalia käsiteltäessä, niiltä osin kuin se oli turvallista toteuttaa. Arvioinnin tekivät tutkimukset toteuttaneet kaksi sisäilma-asiantuntijaa.

Aistinvaraisissa arvioinneissa keskityttiin PAH-yhdisteisiin viittaaviin hajuihin, mutta huomioitiin myös muut mahdolliset hajut ja epäpuhtauslähteet. PAH-yhdisteisiin viittaavien haju- ja hajun osalta on luokiteltu hajun voimakkuus, hajun luonne ja sen häiritsevyys alla esitettyjen luokitusten mukaisesti.

Hajun voimakkuus

- 0 Ei hajua
- 1 Ajoittainen lievä, tai jatkuva hyvin lievä haju
- 2 Ajoittainen selvä, tai jatkuva lievä haju
- 3 Jatkuva selvä haju

Hajun kuvaus

- A Tyypillinen "ratapölkyn" haju
- B Savua muistuttava haju
- C Koipalloa muistuttava haju
- D Pistävä, epämiellyttävä

Hajun häiritsevyys

- * Ei häiritsevä
- ** Hiukan häiritsevä
- *** Erittäin häiritsevä

Lisäksi tutkittu tila ja sen ympäröivät alueet katselmointiin aistinvaraisesti poikkeavien hajujen ja yleisen ilmanlaadun, sekä kosteusvauriojälkien ja muiden sisäilmanlaatuun liittyvien tekijöiden osalta. Tilojen pinnat tarkastettiin aistinvaraisesti rakennetta rikkomatta niiltä osin, kuin ne olivat huonekalujen ja irtaimen puolesta tarkastettavissa.

Myös mahdolliset lähtötiedoissa annetut tiedot tilan käyttäjien kokemasta sisäilmanlaadusta tai mahdollisista oireista huomioitiin.

2.3.2 Lämpötila

Tutkitun tilan lämpötilaa arvioitiin aistinvaraisesti ja mittalaitteilla.

Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausta tehtiin jatkuvatoimisilla Testo 174-mittalaitte-tiedonkerääjäyhdistelmillä tutkimuspäivien aikana. Mittalaitteiden tarkkuus on $\pm 0,5$ °C ja ± 3 %RH (2...98 %RH välillä).

Lisäksi tutkitun rakenteen ja PAH-yhdistepitoisen materiaalin pintalämpötila mitattiin pintalämpömittarilla (Raytec Raynger ST). Laitteen tarkkuus on ± 2 °C.

2.3.3 Ilmankosteus

Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausta tehtiin jatkuvatoimisilla Tinytag Plus 2- mitta-laite-tiedonkerääjäyhdistelmällä tutkimuspäivien aikana. Mittalaitteiden tarkkuus on ± 0.2 °C ja ± 3 %RH. Laitteen mittausalue on $-25...+85$ °C, $0...100$ %RH

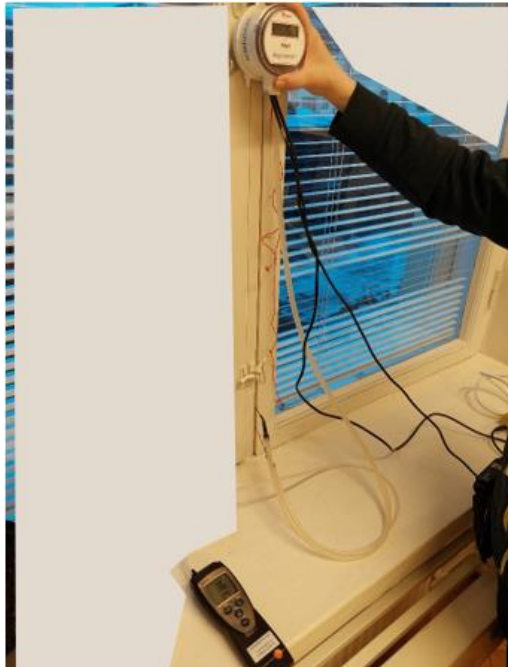
2.3.4 Ilmanvaihto

Tutkitun tilan ilmanvaihtoa ja sen toimivuutta arvioitiin lähtötietojen ja kohteessa tehtyjen havaintojen pohjalta. Tutkitusta tilasta selvitettiin ilmanvaihtojärjestelmän tyyppi, mahdolliset erilliset viilennys tai puhallinlaitteet, mahdollisuuksien mukaan tulo- ja poistoilmamäärät ja ilmanvaihtokerroin.

2.3.5 Painesuhteet

Kohteessa ilman liikkeitä ja painesuhteita arvioitiin aistinvaraisesti ja mittalaitteilla. Paineeron mittaukset suoritettiin tutkitun tilan ja ulkoilman välillä sekä osassa kohteesta tutkitun tilan ja viereisten tilojen välillä. Mikäli tutkitusta tilasta ei ollut ulkoilmayhteyttä, mitattiin paine-ero ulkoilmaan mahdollisimman lähellä sijainneesta tilasta.

Rakenneliittymien ilmatiivyyttä ja rakenteiden ja tilojen välisten ilmavirtausten suuntia tarkasteltiin Regin-merkkisavun avulla (Regin HVAC Products Inc. USA). Merkkisavu on valkoista paksua savua, jonka avulla havainnoidaan ilman virtauksia.



Sisätilan ja ulkoilman tai viereisten tilojen välinen paine-ero mitattiin lyhytkestoisella (noin 1 minuutti) paine-eromittauksella käyttäen Testo 512-paine-eromittaria (Testo Sensor GmbH, Saksa) (kuva 40). Mittaustulokset ovat suuntaa-antavia ja kuvaavat hetkellistä tilannetta.

Painesuhteiden seurantamittaus toteutettiin jatkuvatoimisilla paine-eromittauksilla Dwyer Magnesense ja Tinytag Plus -mittalaite-tiedonkerääjäyhdistelmällä tutkimuspäivien aikana (Dwyer Instruments LLC, USA). Tutkimuksissa seurattiin normaalitilanteen painesuhteita ja alipaineistusta. Laitteiston tarkkuus on 25 °C:ssa on ± 3 Pa ± 1 % lukemasta.

Kuva 40. Paine-erojen mittausta tehtiin eri menetelmillä.

2.4 Rakennusmateriaalien tutkimukset

2.4.1 Rakennusmateriaalien irrotus ja käsittely

Rakennusmateriaaleista irrotettiin kappaleita pintaemissiomittauksia ja materiaalin PAH-yhdistepitoisuuden mittausta varten. Rakenneavaukset tehtiin eri kohteissa marraskuun 2021 ja huhtikuun 2022 välisenä aikana.

Pintaemissiomittauksia varten PAH-yhdistepitoinen materiaali pyrittiin irrottamaan rakenteesta mahdollisine alusmateriaaleinen, itse materiaalia vaurioittamatta. Materiaalin ja sisäilman väliset materiaalikerrokset pyrittiin irrottamaan PAH-yhdistepitoisesta materiaalista niin ikään sen pintaa rikkomatta.

Rakennusmateriaalien irrotus tehtiin kullekin rakenneosalle soveltuvalla menetelmällä. Kunkin tutkimukseen otetun rakennusmateriaalin tarkempi irrotustapa ja käsittely on esitetty kappaleissa 2.2.1...2.2.5. Materiaalien irrotuksessa ja eri käsittelyvaiheissa ennen analysointia pyrittiin välttämään materiaalin pinnan vaurioitumista ja lämpenemistä, jotta haihtuvimmat PAH-yhdisteet eivät pääsisi haihtumaan.

Näytteet pakattiin mahdollisimman tiiviisti, näytteen koosta riippuen joko ilmatäviisiin säilytysastioihin, kaasutiiviisiin Rilsan-pusseihin tai alumiinifolioon, joka tiivistettiin alumiiniteipillä. Pakkaamisessa pyrittiin minimoimaan sahaus-/leikkauspinoilta emittoituvien yhdisteiden päätyminen mitattavalle pinnalle. Näytteiden kuljetuksissa ja varastoinneissa huomioitiin kylmäketjun katkeamattomuus. Näytteet toimitettiin laboratorioon muutama vuorokausi näytteenoton jälkeen, tällä välillä näytteet säilytettiin pakastimessa.

Kaikki näytteet koostuivat useammista osista, joiden leikkauspinnat käsiteltiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa kappaleessa 2.4.4 esitetyn taulukon 8 mukaisesti.

Työn aikana todettiin, että näytteiden irrotuksella voi olla vaikutus näytteen pintaemissioihin. Tähän liittyvät havainnot ja arvioidut vaikutukset tutkimustuloksiin, on esitetty alla.

- **Materiaali 1, pikisively:** Näytteenä oli betonilieriöitä, joiden pinnalla oli pikikerros. Alapohjarakenteesta irrotetut poralieriöt (6 x ø120 mm) saatiin irrotettua ehjinä ja irrotuksessa käytettiin vesijäähdytystä. Yläpuolinen rakenne irtosi pien pinnasta ilman mekaanista irrotusta, koska pikikerroksen ja kevytbetonin välissä oli hiekkakerros. Pien pinta ei silmämääräisesti arvioituna rikkoutunut, mutta pinnalla ollut hiekka on voinut kuitenkin naarmuttaa pintaa irrotuksessa. Pikikerroksen pinta ei ollut "lasittuneen" oloinen vaan kauttaaltaan huokoinen. Irrotuksessa mahdollisesti aiheutuneilla vähäisillä vaurioilla ei arvioida olevan suurta merkitystä emissiotuloksiin, koska pikikerroksen pinta ei ollut lasittunut.
- **Materiaali 2, valuasfaltti:** Näytteenä oli tiililieriöitä, joiden pinnalla oli valuasfalttikerros. Kellarin seinärakenteesta irrotetut poralieriöt (12 x ø120 mm) saatiin irrotettua ehjinä ja irrotuksessa käytettiin vesijäähdytystä. Lieriöt irrotettiin alueelta, jossa valuasfaltin sisäpinnalla oli rappaus. Rappaus irtosi kaikista lieriöistä näytteen irrotuksen aikana ilman erillistä työstöä. Rappauksen alla olleen asfaltin pinta oli lasittuneen oloinen. Rappauksen irtoaminen on voinut naarmuttaa ja rikkoa valuasfaltin pintaa ja pintaan on voinut syntyä hiushalkeamia irrotuksen aikana. Rappauksen irtoaminen ja pinnan mahdollinen vaurioituminen on voinut lievästi kasvattaa emissioita.
- **Materiaali 3, tervapaperi:** Näytteenä oli ulkoseinärakenteen sisältä irrotettu, turveharkon ympärille kääritty tervapaperi. Paperin pinta vaurioitui materiaalin etsimis- ja irrotusprosessissa monin paikoin. Paperin haihtuvien yhdisteiden pitoisuus oli kuitenkin melko alhainen ja ehjää paperia saatiin riittävä määrä emissiotutkimuksiin.

Näin ollen irrotuksessa aiheutuneiden vaurioiden ei arvioida olevan merkityksellisiä tulosten kannalta.

- **Materiaali 4, korkkieriste:** Näytteenä oli noin 30 cm x 50 cm kokoisia korkkieristelevyn palasia, joiden pinnalla oli sementtipohjainen rappaus/tasoite ja maali. Palaset irrotettiin rakenneaineisen ilmanvaihtokanavan pinnalta tilan katosta. Tasoitekerros oli erittäin tiukasti kiinni korkkilevyssä eikä sen irrotus ilman merkittäviä vaurioita onnistunut. Tämän vuoksi korkkieristeen emissiot tutkittiin kammiotekniikalla erikseen sekä tasoitteen kanssa että tasoitteen irrottamisen jälkeen. Tasoitekerros irrotettiin levystä timanttisahaamalla, jolloin korkkirakeiden pinta rikkoontui. PAH-yhdisteitä sisältävää mustaa bitumi-/pikiliuosta oli rakeiden pinnalla, jolloin halkaisun jälkeen levyn pinnalla oli ”puhtaampia” korkkirakeita. Toisaalta leikkaaminen rikkoi korkkirakeiden/pikiliuoksen pintaa, jolloin emissiot ovat voineet lisääntyä. Leikkaamisella on voinut olla emissioita vähentävä ja lisäävä vaikutus.
- **Materiaali 5, bitumiliima:** Näytteenä oli betonirakenteisesta välipohjasta timanttioraamalla irrotettuja näytelieriöitä, joiden yläpinnassa oli noin 10–15 mm bitumiliima. Poralieriöt (8 x ø120 mm) saatiin irrotettua ehjinä ja irrotuksessa käytettiin vesijäähdytystä. Bitumiliimalla oli kiinnitetty sauvaparketti lattiaan. Sauvaparketti irrotettiin bitumiliimasta hallitusti, mutta parketin irrotus on voinut vaurioittaa massan pintaa ja lisätä emissioita. Toisaalta parketti oli melko heikosti kiinni liimassa ja hallitulla irrotuksella pinnan vauriot jäivät melko vähäisiksi. Lisäksi haihtuvien yhdisteiden osuus bitumiliiman sisältämistä PAH-yhdisteistä oli vähäinen, joten vaikutus emissiotuloksiin on todennäköisesti vähäinen.
- **Materiaali 6, tervapahvi:** Näytteenä oli julkisivulta, katetun terassin alta kokonaisena veitsellä irrotettu noin 0,5 m x 1,5 m pala tervapaperia. Julkisivun laudoitus oli purettu noin viikkoa aiemmin konservaattorin toimesta ja suojattu huovalla. Laudoituksen purkamisella etukäteen ei arvioida olevan merkitystä materiaalin pitoisuuksiin, koska tervapaperi oli suojattuna auringonvalolta eikä haihtumisen arvioida olevan merkittävää rakenteen aukioloaikana.

2.4.2 Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet

Rakennusmateriaalien PAH-yhdistepitoisuudet määritettiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa. Rakennusmateriaalinäytteet saapuivat laboratorioon hyvin suojatuissa pakkauksissa ja mahdollisimman ilmatiiviisti alumiinifolioon ja/tai kaasutiiviisiin muovipusseihin pakattuina. Laboratorioon toimitetuista näytekappaleista otettiin sopivat pienimuotoiset osanäytteet materiaalitypitystutkimuksiin.

Materiaalinäytteet pilkottiin, punnittiin noin 500 mg ja uutettiin neljässä millilitrassa dikloorimetaania. Suodatuksen (Millipore, 0,45 µm) ja laimentamisen jälkeen näytteet siirrettiin näytevialeihin analyysia varten ja säilytettiin tarvittaessa pakastimessa. PAH-yhdisteet määritettiin dikloorimetaaniuuton jälkeen kaasukromatografilla-massaspektrometrillä (GC-MS) Työterveyslaitoksen työohjeen KEMIA-TY-045 mukaisesti.

Analysoinnissa käytettiin kalibroitiseosta, joka sisältää **naftaleenia**, 1- ja 2-metyyli-naftaleenia, **asenaftyleenia**, **asenafteenia**, **fluoreenia**, **fenantreenia**, **antraseenia**, **fluoranteenia**, **pyreenia**, **bentso[a]antraseenia**, **kryseenia**, **bentso[b]fluoranteenia**, **bentso[k]fluoranteenia**, **bentso[a]pyreenia**, **indeno[1,2,3-cd]pyreenia**, **dibentso[a,h]antraseenia ja bentso[ghi]peryleenia** (PAH(16)-listan yhdisteet lihavoitu). Materiaalinäytteistä on edellä mainitun yhdistelistan lisäksi tutkittu 7H-bentso[c]fluoreenia, 5-metyylikryseenia, dibentso[a,l]pyreenia, dibentso[a,e]pyreenia, dibentso[a,i]pyreenia, dibentso[a,h]pyreenia. GC-MS menetelmän kalibroitava pitoisuusväli oli materiaalinäytteille 2,5–500 ng/ml.

PAH-yhdisteiden kaasukromatografinen analyysi suoritettiin Agilent Technologies GC-MS laitteella elektroni-ionisaatiolla. Kolonnina käytettiin HP5-MS 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm (Agilent) nopealla lämpötilagradientilla (350 °C asteeseen) noin 25 minuutissa. Heliumia käytettiin kantajakaasuna 2 ml/min vakiovirtauksella. Analyysit on tehty valitun ionin monitorointimenetelmällä, jolloin analyysin aikaikkunoissa on ollut 1–3 kvantitointi-ionia ja kaikille kaksi varmistusionia. Kromatogrammit integroitiin ChemStation-ohjelmalla ja lopulliset tulokset laskettiin Excel-taulukoissa.

2.4.3 Kokonaisemissio- eli bulk-tutkimukset

Rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden kokonaisemissiotutkimukset tehtiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa. Rakennusmateriaalinäytteet saapuivat laboratorioon hyvin suojatuissa pakkauksissa ja mahdollisimman ilmatiiviisti alumiinifolioon ja/tai kaasutiiviisiin muovipusseihin pakattuina. Laboratorioon toimitetuista näytekappaleista otettiin sopivat pieni- muotoiset osanäytteet kokonaisemissiotutkimuksiin.

Rakennusmateriaalinäytteiden PAH-emissiot tutkittiin mikrokammiolaitteella Micro-Chamber/Thermal Extractor (µ-CTE; Markes International). Rakennusmateriaalinäytteet esikäsiteltiin tapauskohtaisesti paloittelemalla, pilkkomalla tai murskaamalla siten, että punnittu näytemäärä mikrokammiossa oli n. 1–5 g ja/tai mikrokammio oli maksimissaan puolillaan näytemateriaalia. Mikrokammiolaitteistolla kerättiin nolla- ja materiaalinäytteet lämpötilassa 25 °C johtamalla kammioon tyypeä virtausnopeudella n. 500 ml/min ja keräämällä näytteet absorptioputkeen (Orbo 43). Näytteenottotilavuudet olivat materiaalinäytteestä riippuen n. 20–100 l. Näytteenottoja uusittiin tarpeen vaatiessa muuttamalla näytteenottotilavuuksia, mikäli esim. PAH-yhdisteiden pitoisuudet ylittivät adsorptiokeräimen kapasiteetin ensiyrittämällä. Adsorptioputket esikäsiteltiin ja analysoitiin Työterveyslaitoksen työohjeen KEMIA-TY-044 mukaisesti.

2.4.4 Pintaemissiotutkimukset kammiotekniikalla

Rakennusmateriaalien PAH-yhdistepitoisuuksien määrittäminen pintaemissiomenetelmällä suoritettiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa. Rakennusmateriaalinäytteet saapuivat laboratorioon hyvin suojatuissa pakkauksissa ja mahdollisimman ilmatiiviisti alumiinifolioon ja/tai muovikalvoihin tai -pusseihin pakattuina.

Pintaemissiotutkimuksiin saapuneet rakennusmateriaalinäytteet esikäsiteltiin ja käyttösovel-luskohtaiset kuormituskertoimet määritettiin soveltaen M1-testausprotokollaa (Rakennustietosäätiö, 2017) ja standardia EN 16516. Pintaemissionäytteet kerättiin kolmen vuorokauden (72±6 h) stabiloitumisjakson jälkeen standardeja ISO 16000-9 ja EN 16516 soveltavalla kammiotekniikalla.

Tutkimuksessa käytettyjen pintaemissioammioiden tilavuus oli 250 l ja kammiolosuhteet olivat vakioituna lämpötilaan 23±1 °C ja suhteelliseen kosteuteen 50±5 %, ilmanvaihtokertoimen ollessa 0,5 (±5 %) 1/h. Emissioammionollat ja -näytteet kerättiin absorptioputkeen (Orbo 43) virtausnopeudella n. 1000 ml/min ja näytteenottotilavuudet vaihtelivat näytekoh-taisesti välillä n. 10–100 l.

Materiaalinäytekohtaiset esikäsitteilyt ja näytekappaleiden valmistukset, pinta-alat ja kuormituskertoimet on esitetty Taulukossa 8. Laboratorioon toimitetut näytekappaleet olivat useimmiten valmiiksi mittaan leikattuja. Näytekappaleiden valmistukset suoritettiin sovel-taen M1-testausprotokollaa. Näytekappaleiden esikäsitteilyn tarkoituksena oli valmistaa näy-tekappaleet pintaemissiotestaukseen siten, että lähtökohtaisesti vain huoneilmaan avoinna olevat näytepinnat olisivat peittämättöminä ja muut osat peitettyinä siten, että pintaemis-sionopeudet edustaisivat vain huoneilmaan avoinna olevaa pintaa. Valitettavasti rajallisen

näytemäärän takia tämä ei aina ollut mahdollista, jolloin tarvittavan kuormituskerroimen saavuttamiseksi jouduttiin osa näytteistä testaamaan peittämättöminä tai vain osin peitettyinä kappaleina, jotta tarvittava kuormituskerroin testauskammiossa saavutettiin pinta-ala perusteisesti.

Taulukko 8. Pintaemissiomittausten näytetiedot ja näytteiden käsittely.

Kohde	Materiaali	Näytekappaleiden esikäsittely	Näytteen pinta-ala [m ²]	Kuormitus testauskammiossa [m ² /m ³]	Kuormitus referenssihuoneessa [m ² /m ³]
Kohde 1	1, pikisively	näytekappaleiden tausta ja reunat kapseloitu (Kiilto Hydrablock sulkuai-neella)	0,09	0,36	0,4 (lattia)
Kohde 3	2, valuasfaltti	näytekappaleiden tausta ja reunat kapseloitu (Kiilto Hydrablock sulkuai-neella)	0,14	0,56	1,0 (seinä)
Kohde 3	3, tervapaperi	näyte testattu sellaisenaan peittämättömänä kappaleena; pinta-alaan las-kettu etu- ja taustapuoli	0,25	1,00	1,0 (seinä)
Kohde 4	4, korkkieriste + rappaus	näyte testattu sellaisenaan; pinta- alassa huomioitu kaikki pinnat	0,13	0,52	0,4 (katto)
Kohde 4	5, bitumiliima	näytekappaleiden tausta ja reunat kapseloitu (Kiilto Hydrablock sulkuai-neella)	0,17	0,68	0,4 (lattia)
Kohde 5	6, tervapahvi	näytekappaleiden tausta ja reunat peitetty alumiinifoliolla ja -teipillä	0,25	1,00	1,0 (seinä)

⁽¹⁾ Korkkieristeen rappaus poistettiin AFRYn toimesta.

2.5 PAH-yhdisteiden sisäilmamittaukset

Sisäilman PAH-yhdisteiden mittaukset tehtiin näytteenotolla kolmessa vaiheessa: 1) mittaus normaaliolosuhteissa, 2) mittaus tila alipaineistettuna (toteutettiin yleensä viipymättä normaaliolosuhteiden mittauksen jälkeen) ja 3) mittaus rakenteen avaamisen yhteydessä (toteutettiin yleensä samana tai seuraavana päivänä alipaineessa tehdyn mittauksen jälkeen). Sisäilmamittaukset tehtiin marraskuun 2021 ja huhtikuun 2022 aikana.

2.5.1 Sisäilmamittaus normaaliolosuhteissa

Sisäilmamittaus normaaliolosuhteissa tehtiin niissä olosuhteissa, kuin tutkimuspäivänä kohteessa vallitsi. Olosuhteita ei muutettu tutkimusten yhteydessä. Tutkitun tilan ovet ja ikkunat suljettiin mittauksen ajaksi.

Näytteenkeräys tehtiin analysoivan laboratorion pumpuilla laboratorion ohjeistuksen mukaisesti. Pumppu (SKC) ja XAD-keräin (Orbo43) sijoitettiin mahdollisuuksien mukaan tilan keskelle, joko tilassa olevalle tasolle tai metalliseen telineeseen noin 1...1,5 m korkeudelle lattiatasosta. Normaaliolosuhteiden näytteenotto tapahtui pääosassa kohteista aamupäivän aikana. Pumpun virtausnopeus oli noin 1 l/min ja keräysaika noin 100 min.

2.5.2 Sisäilmamittaus tila alipaineistettuna

Alipaineessa tehdyssä näytteenotossa noudatettiin samaa menetelmää kuin normaaliolosuhteiden näytteenotossa.

Alipaineistusta varten mahdolliset ilmanvaihdon pääte-elimet tai tulo-/poistoilmasäleiköt suljettiin tiiviisti muovilla ja teipillä. Tilan ja lähialueen tilojen ovet ja ikkunat suljettiin. Merkittävimmät epätiivetykohdat (epätiivyt ovet/ikkunat) tiivistettiin teipillä.



Tilan alipaineistaminen toteutettiin Minneapolis Blowerdoor Model 4,1 ja DG-700 laitteistolla, joka asennettiin tilan ovelle. Mittauksen ajaksi (noin 1,5 h) kulku tilaan estettiin, jotta ovien avaamisen painevaihtelut eivät häirinneet mitausta. Mahdollisia tilankäyttäjiä pyydettiin välttämään mittauksen aikana ovien tai ikkunoiden avaamista läheisissä tiloissa.

Tutkittuun tilaan pyrittiin saavuttamaan noin 10–15 Pa alipaine ulkoilmaan verrattuna, tai mikäli paine-eroa ulkoilmaan ei saatu mitattua, ympäröiviin tiloihin verrattuna. Alipaineistuksen toteutumista seurattiin jatkuvatoimisella paine-eromittauksella Dwyer Magnesense ja Tinytag Plus -mittalaitte-tiedonkerääjäyhdistelmällä (kuva 41).

Kuva 41. Tutkittavan tilan alipaineistusjärjestelyjä ja paine-eron seuranta.

2.5.3 Sisäilmamittaus rakenteiden avaamisen jälkeen

Rakenteiden avausta varten tutkittava tila osastoitiin pölytiivisti irrotustyön toteuttaneen urakoitsijan toimesta. Osastoinnissa hyödynnettiin pääosin olemassa olevia rakenteita. Materiaali 4:n näytteenottoalueelle tehtiin erillinen osasto muovista ja puurimoista. Tilan ovelle asennettiin muovista kaksinkertainen läppövirakenne tai vetoketjuovi. Pienempiin tiloihin rakennettiin oven ulkopuolelle erillinen sulkutila muovista ja puurimoista.

Tilan poistoilma ohjattiin aktiivihillisuodattimen kautta muovisella ulospuhallussukalla ulkoilmaan. Tila pidettiin alipaineistettuna (~10–15 Pa) koko irrotustyön, tilan siivoamisen ja rakenteiden paikkauksen ajan.

Sisäilmanäytteen keräys ajoitettiin rakenteen avaamisen ajalle. Mittaus lopetettiin ennen rakenteiden paikkausta. Keräin ja pumppu sijoitettiin mahdollisuuksien mukaan tilan keskelle noin 1...1,5 m korkeudelle metalliseen telineeseen. Näytteen keräys pyrittiin tekemään kuten normaalitilanteen ja alipaineistuksen näytteenotto. Keräysajoissa on kuitenkin vaihtelua, koska purkuosastoon ei ollut kaikissa tiloissa mahdollista päästä kesken työn. Analyysituloksissa on huomioitu näytteenoton ilmamäärä ja mittausaika.

Näytteen 5 osalta ei ole sisäilmatuloksia rakenteen avaamisen ajalta, koska tutkittava materiaali sijaitsi ulkoseinärakenteen ulko-osassa ja rakenneavauksen toteutti konservaattori erillisenä ajankohtana.

2.5.4 Sisäilmanäytteiden analyysi

Sisäilmanäytteiden PAH-yhdistepitoisuuksien määrittäminen suoritettiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa. Ilmanäytteet kerättiin XAD-hartsia sisältävään keräimeen (Orbo, Supelco), näytetilavuus oli noin 100 litraa. Keräinten päät tulpattiin, käärrettiin tarvittaessa alumiinifolioon, pakattiin ilmatiiviiseen rasiaan ja säilytettiin viileässä. Laboratoriossa keräinten sisältö uutettiin kahdessa millilitrassa dikloorimetaania. PAH-yhdisteet määritettiin

dikloorimetaaniuuton jälkeen kaasukromatografilla-massaspektrometrillä (GC-MS) Työterveyslaitoksen työhöjään KEMIA-TY-044 mukaisesti.

Analysoinnissa käytettiin kalibroitiseosta, joka sisältää **naftaleenia**, 1- ja 2-metyyli-naftaleenia, **asenaftyleenia**, **asenaftteenia**, **fluoreenia**, **fenantreenia**, **antraseenia**, **fluoranteenia**, **pyreenia**, **bentso[a]antraseenia**, **kryseenia**, **bentso[b]fluoranteenia**, **bentso[k]fluoranteenia**, **bentso[a]pyreenia**, **indeno[1,2,3-cd]pyreenia**, **di-bentso[a,h]antraseenia** ja **bentso[ghi]peryleenia** (PAH(16)-listan yhdisteet lihavoitu). GC-MS menetelmän kalibroitava pitoisuusväli oli ilmanäytteille 1,25–250 ng/ml.

PAH-yhdisteiden kaasukromatografinen analyysi suoritettiin Agilent Technologies GC-MS laitteella elektroni-ionisaatiolla. Kolonnina käytettiin HP5-MS 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm (Agilent) nopealla lämpötilagradientilla (350 °C asteeseen) noin 25 minuutissa. Heliumia käytettiin kantajakaasuna 2 ml/min vakiovirtauksella. Analyysit on tehty valitun ionin monitorointimenetelmällä, jolloin analyysin aikaikkunoissa on ollut 1–3 kvantitointi-ionia ja kaikille kaksi varmistusionia. Kromatogrammit integroitiin ChemStation-ohjelmalla ja lopulliset tulokset laskettiin Excel-taulukoissa.

2.5.5 Sisäilmanäytteenottoon liittyneet huomiot

Alla on esitetty huomioita sisäilmanäytteenottoon ja niiden yhteydessä tehtyihin aistinvaraisiin havaintoihin liittyen.

Materiaali 1 (pikisively): Tutkimuksessa otettiin ilmanäytteitä kahdesta tilasta 1.1 ja 1.3. Rakennusmateriaalinäytteet otettiin, tilaan 1.3 yhteydessä olevasta pienemmästä varastotilasta 1.1, jossa tiedettiin olevan pikisivelyä. Tilaan 1.3 ei voitu tehdä rakenneavauksia tilankäytön vuoksi, eikä tilan 1.3 alapohjarakenne tai pikisivelyn olemassaolo tilan 1.3 puolella, näin ollen ole selvillä. Tila 1.1 oli rakenneavausten aikaan osastoituna, eikä pieneen noin 1,5 m² kokoiseen tilaan ollut rakenneavausten aikaan pääsyä tai mahdollista toteuttaa näytteenottoa. Sisäilmanäyte "materiaalia rikottaessa" on kerätty tilan 1.3 puolelta, jonne levisi yllättäen voimakasta PAH-yhdisteiden hajua tilan 1.1 osastosta (mahdollisesti putkikanaalin kautta). Myös aistinvarainen arvio hajusta on tilasta 1.3. Näytteen keräys tilasta 1.3 aloitettiin hajun havaitsemisen jälkeen ja näytteenottoaika on muita mittauksia hiukan lyhyempi. On todennäköistä, että tilan 1.1 sisäilman PAH-yhdisteiden pitoisuudet ovat olleet rakenteiden avaamisen aikaan huomattavasti suuremmat kuin tilasta 1.3 mitatut.

Materiaali 2 (valuasfaltti): Ennen rakenteita rikkovia tutkimuksia ja näiden aikana tehtyä sisäilmanäytteenottoa tilaan 3.1.1 tehtiin mittavat tiivistystoimet rakenneliittymiin ja läpivienteihin, koska riskinä oli rakenneavausten yhteydessä vapautuvien hajujen leviäminen ylempiin kerroksiin, joissa oli tutkimusten aikaan käyttöä. Myös aiemmat vaurioituneet valuasfalttipinnat paikattiin ja kapseloitiin. Näin ollen voidaan arvioida, että muista kuin tilassa olleesta (ehjästä) valuasfaltista johtuvien PAH-yhdistepäästöjen osuus on hyvin vähäinen. Aistinvarainen arvio hajusta materiaalia rikottaessa on tehty noin kaksi tuntia näytteiden irrotuksen jälkeen, jolloin valuasfalttipinnalle oli jo levitetty yksi kierros kapselointiainetta. Arvio hajusta tehtiin hyvin nopeasti osaston sisältä, haju oli sietämätön.

Materiaali 3 (tervapaperi): Tutkitusta tilasta 3.2.1 on ovi kellariin johtavaan porrashuoneeseen. Tila 3.2.1 oli lievästi alipaineinen porrashuoneeseen nähden eikä niiden välinen palo-ovi ollut tiivis merkkisavulla tehtyjen havaintojen perusteella. Porrashuoneessa on havaittu PAH-yhdisteisiin viittaavaa hajua, joka on todennäköisesti peräisin kellarista tai alemmista kerroksista. Myös tilan 3.2.1 puolella havaittiin ajoittaista, lievää PAH-yhdisteisiin viittaavaa "ratapölkyn" hajua. Alipaineessa ei tutkitussa tilassa havaittu juurikaan muutosta hajuun, rakenneavauksessa ja tutkitussa tervapaperissa havaittiin hyvin vähäinen PAH-

yhdisteisiin viittaava haju. On mahdollista, että osa tilasta 3.2.1 aistinvaraisesti havaituista ja mitatuista PAH-yhdisteiden sisäpitoisuuksista on peräisin tilan ulkopuolisista lähteistä.

Materiaali 4 (korkkieriste): Tutkittu alue (tila 4.1.1) on osa suurempaa kellaritilaa. "Normaalitilanteessa" otettu näyte kerättiin tutkittavan alueen keskeltä, aluetta ei osastoitu. Alipaineessa ei tehty erillistä mittausta; tutkitulla alueella ei ole ikkunoita, mutta alue oli "normaalitilanteessa" noin 20 Pa alipaineinen suhteessa viereiseen ilmanjakokanavaan. Kellari oli lievästi alipaineinen suhteessa ylempään kerrokseen. Rakenteita rikkovia tutkimuksia varten tehtiin näytteenottoalueelle kaksiosainen, yhteispinta-alaltaan noin 3 m² osasto, josta otettiin rakenneavausten aikainen ilmanäyte.

Materiaali 5 (bitumiliima): Tutkittu tila 4.2.1 on ollut aiemmin kahden kerroksen korkuinen. Tilaan on lisätty uusi välipohja noin 1950-luvulla, jolloin tilasta on tullut nykyisen korkuinen. Muutoksen yhteydessä on muun muassa peitetty korkeassa tilassa olleita ikkunoita levytyksellä ja mineraalivillalla. Levytykset olivat havaintojen mukaan epätiivittä ja rakenteista / kerrosten välillä voi kulkeutua ilmaa ja epäpuhtauksia erityisesti tilan ollessa alipaineinen. Tilan alueella oli myös mahdollisia vanhoja (savu)hormeja. Tilan ikkunoiden rakenneliittymien tiiveys oli lisäksi heikko ja tilasta oli ovet viereisiin tiloihin, ovien tiiveys oli kohdalainen. Alipaineistuksen aikana tutkittuun tilaan levisi melko voimakas savua muistuttanut haju, joka ei vastannut bitumiliimassa aistittua hajua. Haju ja tilassa alipaineistuksen aikaan mitatut PAH-yhdisteet ovat havaintojen perusteella voineet olla peräisin myös tilan ulkopuolelta.

Materiaali 6 (tervapahvi): Normaalitilanteen ja alipaineessa tehtyjen sisäilmamittausten välillä oli muiden kohteiden tutkimuksiin verrattuna poikkeuksellisen pitkä aika, noin kaksi viikkoa. Normaalitilanteen mittaus on tehty 12.4.2022 ja alipaineessa 28.4.2022, tällä aikavälillä säätila oli lämmennyt kevään edetessä. Julkisivulle tehtiin normaalitilanteen mittauksen jälkeen tilan 5.1 kohdalle rakenneavaus, jossa irrotettiin julkisivun laudoitusta pieneltä alalta ja varmistettiin tervapahvin olemassaolo tilan kohdalla. Avaus oli väliaikaisesti paikattu / tiivistetty muovilla alipaineessa tehdyn mittauksen ajaksi. Rakenneavausten aikaista havainnointia ei voitu tehdä, koska avaukset toteutti konservaattori erillisenä ajankohtana. Aistinvaraiset arviot tilanteesta, "jossa materiaalia rikotaan", on tehty huhtikuun lopulla konservaattorin tekemästä erillisestä avauksesta, materiaalinäytteen irrotuksen ja käsittelyn yhteydessä rakennuksen ulkopuolella.

Kohteessa tehtiin (erillisiä) PAH-yhdisteiden sisäilmamittauksia ja aistinvaraisia havaintoja myös kesäaikaan (22.7.2022) ulko- ja sisäilman lämpötilojen ollessa huomattavan paljon kevään mittauksia korkeampia. Tutkimusten havainnot ja mittauksien tulokset on esitetty rinnakkaisluokkien vertailussa kappaleessa 3.2.2)

2.6 Hajukynnyksen määrittäminen

Naftaleenille kirjallisuudessa esitetyt hajukynnykset vaihtelevat erittäin voimakkaasti, mistä syystä määritettiin hajukynnyksen uudelleen tätä tutkimusta varten.

Naftaleenin hajukynnys määritettiin soveltaen mahdollisuuksien mukaan standardia EN 13725. Hajukynnyksen määrittäminen tehtiin standardista EN 13725 poiketen standardin ISO 16000-28 mukaisella PureSniff XL (Olfasense GmbH) haistelulaitteella. Standardi ISO 16000-28 on rakennusmateriaalien aistinvaraiseen arviointiin keskittyvä standardi, joka on esimerkiksi M1-päästöluokitusten yhteydessä suoritettavien hajun hyväksyttävyyserviointien yhteydessä käytössä. Naftaleenia kerättiin eri pitoisuuksissa (n. 1–15 µg/m³) noin 60 litran haistelupusseihin (materiaalina Nalophan®, pussit käyttötarkoitukseensa sertifioituja, Olfasense GmbH) ja hajun arviointi järjestettiin n. 0,5–6 tunnin sisällä pussien täyttämistä. Naftaleenin eri pitoisuudet tuotettiin permeaatiounilla (Dynacalibrator 345, VICI

Metronics Inc.) hyödyntäen naftaleenille spesifistä permeaatioputkea (VICI Metronics Inc.). Laimennosilmana permeaatiouunin kanssa käytettiin puhdistettua paineilmaa. PureSniff XL -haistelulaitteen näyteilman syöttövirtaus oli asetettu haistelijalle 0,7 l/s (eli ~42 l/min) oletusarvoon ISO 16000-28 mukaisesti, mikä täyttää myös standardissa EN 13725 esitetyn haisteluilman esitysvirtauksen minimivaatimuksen.

Haistelut järjestettiin EN 13725 mukaisesti Kyllä/Ei ("Yes/No") -menetelmällä, jossa haistelijaa pyydetään arvioimaan aina yhtä haistelupussia kerrallaan ja ilmoittamaan havaitseeko hän hajun vai ei. Haistelija oli tietoinen siitä, että joissakin tapauksissa voitiin esittää pelkkää neutraalia/puhdasta (blank) ilmaa. Haistelut järjestettiin laimeammasta pitoisuudesta korkeampaan pitoisuuden ja laimennossarjassa oli aina satunnaisessa kohdassa mukana blank-pussi.

Tutkimuksessa käytetyt naftaleenin pitoisuudet valittiin pohjautuen kirjallisuudesta poimituun alhaisimpaan $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hajukynnysarvoon. Haistelusarjan pitoisuudet mitattuina suoraan haistelupusseista olivat: $1,4 \pm 0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2,6 \pm 0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7,5 \pm 2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja $15,4 \pm 4,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (+ nollanäyte, puhdistettua paineilmaa). Naftaleenin pitoisuudet haistelupusseista määritettiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa standardin ISO 16000-6 mukaisella termodesorptio-kaasukromatografia-massaspektrometri (TD-GC-MS)-menetelmällä. Ilmanäytteet kerättiin haistelupusseista suoraan Tenax TA-adsorptioputkiin, analysoitiin TD-GC-MS:lla ja naftaleenin pitoisuus määritettiin omalla vasteella. Menetelmän mittausepävarmuus omalla vasteella määritettynä on 30 %. Edellä esitetyt laimennussarjan pitoisuuksien keskihajonnat sisältävät vain analyysimenetelmän laajennetun mittausepävarmuuden.

Alustavissa laboratoriotesteissä havaittiin, että naftaleenin pitoisuus haistelupussissa hieman tippui tuoreen haistelupussin ja sellaisenaan stabilisoituneen pussin välillä. Käytännössä pitoisuus saattoi tippua n. 5–20 % muutamassa tunnissa (standardin ISO 16000-28 mukaisesti haistelu on suositeltavaa suorittaa 6 h sisällä pussin täyttämisestä). Laimennossarjan pusseista otettiin ilmanäytteet pitoisuuksien määrittämiseen haisteluajankohdan jälkeen ja näiden perusteella määritettiin keskimääräinen pitoisuus. Vaikka ilmanäytteet kerättiin pikimmiten haisteluhetken jälkeen, on mahdollista, että varsinaisessa haisteluutilanteessa naftaleenin pitoisuus pussissa oli hieman suurempi, mutta kuitenkin mittausepävarmuuden sisällä.

Haistelut järjestettiin Työterveyslaitoksella tyypillisessä laboratoriohuonetilassa. Testihuone ei sellaisenaan täyttänyt EN 13725 tai ISO 16000-28 kriteerejä, sillä esim. testihuoneen taustahajua ei erikseen määritetty/hyväksytetty. Testihuoneen lämpötila oli haisteluiden aikana keskimäärin $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellinen kosteus $53 \pm 2 \%$, jotka olivat EN 13725 vaatimusten sisällä. Haistelut järjestettiin viiden hengen ryhmissä. Kukin haistelija arvioi haistelupussin vuorollaan ja ilmaisi Kyllä/Ei arvionsa. Panelistit olivat toistensa arvioista tietämättömiä. Haistelusarja toistettiin kolme kertaa per arvioitsija.

Standardin EN 13725 mukaisesti hajupanelistien valintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota. Kuten aiemmin mainittiin, EN 13725 ohjeistaa valitsemaan panelistit n-butanolin hajukynnysmäärityksen perusteella ja ennalta määrättyjen kriteerien mukaisesti panelistiksi voi päästä vain rajattu joukko henkilöitä. Hajupanelistien keskinäinen hajukynnyksen arvioinnin vaihteluväli tulisi olla mahdollisimman pieni. Tässä tutkimuksessa ei ollut käytettävissä resursseja järjestää erillistä ennakoivaa n-butanolin hajukynnysmääritystä panelistien valintaan, mutta panelistien keskinäisen johdonmukaisuuden ja kapean vaihteluvälin huomioidemiseksi hyödynnettiin Työterveyslaitoksella järjestettävän M1-päästöluokituksen yhteydessä tehtävien rakennusmateriaalien aistinvaraisien arviointien tilastollista mittausaineistoa. Panelistit valittiin pohjautuen ns. M1-haisteluiden numeerisiin hyväksyttävyyssarvioihin sen mukaisesti, että tähän hajukynnystutkimukseen valitut panelistit edustivat

johdonmukaisesti olevansa keskimääräisten hajun hyväksyttävyyssarvioiden kohdalla laajemman panelistijoukon tilastollisen keskiarvon ja keskihajonnan sisällä mahdollisimman systemaattisesti. On kuitenkin huomioitava, että M1-haisteluissa hyödynnetään kouluttamattomia hajupaneelia, joten tutkimukseen osallistujat ovat kategorisesti kouluttamattomia haistelijoita.

Naftaleenin hajukynnysmääritys järjestettiin 15 hajupanelistilla (3 x 5 henkilön ryhmiä). Laimennossarjan haistelu toteutettiin kolmella toistolla per hajupanelisti. Retrospektiivisen tarkastelun jälkeen, kriteerit täyttävien panelistien lukumäärä oli 7 kpl, kun panelisteista poistettiin mm. henkilöt, jotka olivat vastanneet ”Kyllä” nollanäytteen kohdalla. Haistelusarjasta ensimmäinen haistelukerta poistettiin systemaattisesti EN 13725 mukaisesti. Tutkimuksen lähtöasetelma oli näin ollen standardin EN 13725 mukainen, jossa minimivaatimuksena on neljä arvioitsijaa ja kaksi sarjan toistoa.

On kuitenkin huomionarvoista, että vaikka hajukynnystutkimus pyrittiin suorittamaan standardia EN 13725 soveltaen, ei tutkimusasetelmassa ja -käytänteissä onnistuttu valitettavasti toteuttamaan standardin ohjeita läheskään vaaditulla yksityiskohtaisuudella. Valittujen hajupanelistien hajuaistimusta ei ennakkoon todennettu, joten hajupanelistien ns. normaalista hajuaistimuksesta ei ole takeita. Lisäksi, koska tutkimukseen ei ollut käytettävissä EN 131725 mukaista dynaamista olfaktometriä, on tuloksiin suhtauduttava varauksella.

2.7 Materiaalipäästöjen laskennallinen tarkastelu

Laskennallisten tarkastelujen lähtökohtana oli pohtia menetelmiä määrittää materiaalipitoisuuden perusteella PAH-yhdisteiden aiheuttama pintatuotto rakenteen sisäpinnalta ja sitä kautta tilaan muodostuva sisäilman pitoisuus. Tarkastelussa hyödynnettiin alla kuvattua teoriaa massan siirtymisestä:

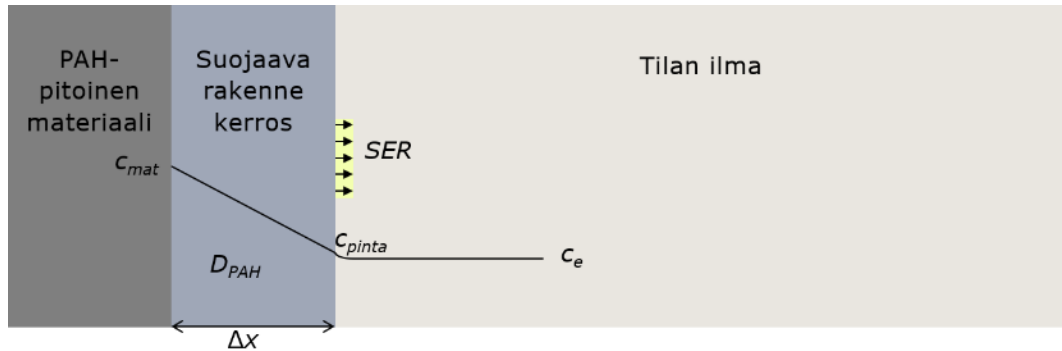
$$SER = \frac{c_e \times n}{L} \quad (3)$$

jossa SER on pintaemissionopeus [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], c_e on yhdisteen mitattu pitoisuus tarkasteltavan tilan ilmassa [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], n on tilan ilmanvaihtokerroin (1/h) ja L on kuormituskerroin, joka saadaan PAH-pitoisen alan sekä huoneen tilavuuden suhdelukuna $L = A_{PAH}/V_{tila}$ [m^2/m^3].

Päästöjä voidaan arvioida myös tarkastelemalla massavirrantiheyttä rakenteesta, jolloin voidaan kirjoittaa:

$$j = -D_{PAH} \frac{c_{mat} - c_{pinta}}{\Delta x} = SER \quad (4)$$

jossa D_{PAH} [m^2/s] on suojaavan rakennekerroksen diffusiviteetti, c_{mat} [kg/m^3] on yhdisteen pitoisuus suojaavan rakennekerroksen sekä PAH-yhdistepitoisen materiaalin rajapinnassa ja c_{pinta} [kg/m^3] rakenteen sisäpinnalla. Tarkasteltavaa tilannetta on havainnollistettu kuvassa 42.



Kuva 42. Havainnekuva tarkasteltavasta tilanteesta.

Laskennallisen tarkastelun reunaehdoja mm. tarvittavien materiaaliparametrien osalta on kuvattu alla:

- Tutkimuksessa suoritettu SER-kammiomittaus materiaalikkappaleella, josta on poistettu pintarakenteet, kertoo pintaemission, kun PAH-yhdistepitoisen materiaalin pinta on avoimena, mutta tulos ei ole suoraan hyödynnettävissä ehjän rakenteen sisäpinnan pinta-tuoton laskemiseen.
- SER-kammiomittauksella ei voitu tarkastella näytettä, joka kuvastaisi ns. ehjää rakennetta, koska pintarakenteet häiriintyivät ja pääosin irtosivat näytteenotossa.
- Suoraa mittausta ehjän rakenteen pinnalta ei ollut mahdollista toteuttaa myöskään FLEC-laitteella pintojen epätasaisuuksien takia.
- Pintatuotto ehjältä pinnalta voidaan kuitenkin laskea sisäilmapitoisuuden perusteella kaavalla 3.
- Materiaalin PAH-yhdistepitoisuuden [mg/kg] tuottamaa pitoisuutta kyseisen häiriintymättömän materiaalin huokosilmaan ei tunneta.
- Kohdan 2.4.3 mukaisen bulk-emissiomittauksen perusteella voidaan arvioida häiriintyneen materiaalin tuottamaa huokosilmapitoisuutta, jota voidaan käyttää suuntaa-antavasti materiaalin tuottotekijänä, mutta joka todennäköisesti yliarvioi tuottoa.
- Suojaavien rakennekerrosten diffusiviteettiä PAH-pitoisille yhdisteille ei tunneta, mutta näitä voidaan arvioida laskennallisesti muiden tietojen perusteella.

Tutkimuksessa pyrittiin eri mittausmenetelmien epävarmuustekijöistä huolimatta tarkastelemaan niitä suureita, joiden laskennalliselle tarkastelulle todettiin olevan teoreettiset edellytykset käytössä olleen aineiston perusteella.

2.7.1 Ehjän rakenteen SER -pintatuotto sekä suojaavan rakenteen $D_{Naftaleeni}$

Laskennassa käytettiin esimerkkiyhdisteenä naftaleenia, joka on PAH-yhdisteistä haihtuvin. Naftaleenin pintaemissio $SER_{Naftaleeni}$ ehjästä pinnasta laskettiin sisäilmapitoisuuden perusteella kaavan 3 avulla. Tulosta hyödyntämällä voidaan kaavasta 4 ratkaista $D_{Naftaleeni}$. Laskennassa arvioitiin c_{mat} vastaavan bulk-emissiota ja c_{pinta} sisäilman pitoisuutta. Suojaavan rakenteen diffusiviteetti naftaleenille on vastaavasti:

$$D_{Naftaleeni} = SER \frac{\Delta x}{c_{mat} - c_{pinta}} \quad (5)$$

2.7.2 Naftaleenin kriittisen materiaalipitoisuuden määrittäminen hajukynnyksen perusteella

Kriittinen materiaalipitoisuus, jolla naftaleeni olisi tarkastelluissa kohteissa aistittavissa valinneissa todellisissa olosuhteissa ja todellisilla rakenteilla, arvioitiin määrittämällä kohdekohtaisesti naftaleenin hajukynnyksen perusteella $SER_{kriittinen}$ kaavan 3 avulla. Koska

laskenta on tehty sisäilman pitoisuuden perusteella, eikä se varsinaisesti ota kantaa mekaniikkiin, jolla PAH-yhdiste on siirtynyt materiaalista, voidaan hyödyntää suhdelukua $SE_{kriittinen} / SE_{laskennallinen}$ kriittisen materiaalipitoisuuden laskentaan mitatusta pitoisuudesta.

Laskennan tuloksia hyödynnettäessä tulee huomioida, että kyseessä ovat esimerkinomaiset tarkastelut, jotka pätevät vain kyseiselle rakenteelle ja kyseisissä olosuhteissa. Tuloksia ei pidä käyttää materiaalien päästöriskin arvioimiseen yleisesti, vaan tavoitteena on materiaalien välisen vertailun avulla havainnollistaa, miten muut tekijät kuin itse materiaalipitoisuus vaikuttavat PAH-yhdistepitoisten materiaalien sisäilmapäästöihin.

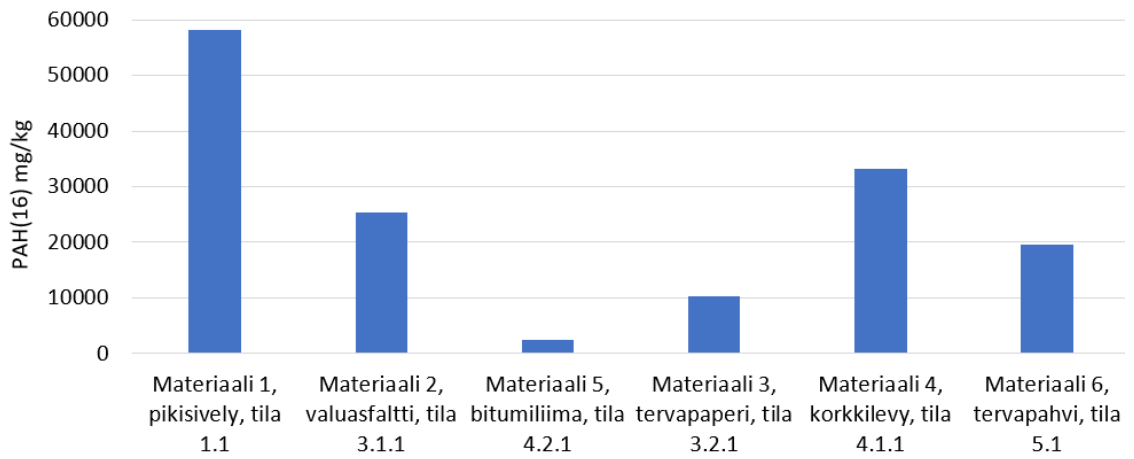
Lisäksi verrattiin mitattuja sisäilmapitoisuuksia hajukynnykseen ja hajuhavaintoihin. Tämän lisäksi pohdittiin, onko mitatun pitoisuuden sekä määritetyn kriittisen pitoisuuden suhde kuvaava suure sisäilmariskin kannalta.

3 Tulokset

3.1 Kohteissa todetut PAH-yhdistepitoiset rakennustuotteet ja niiden päästöt

3.1.1 Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet

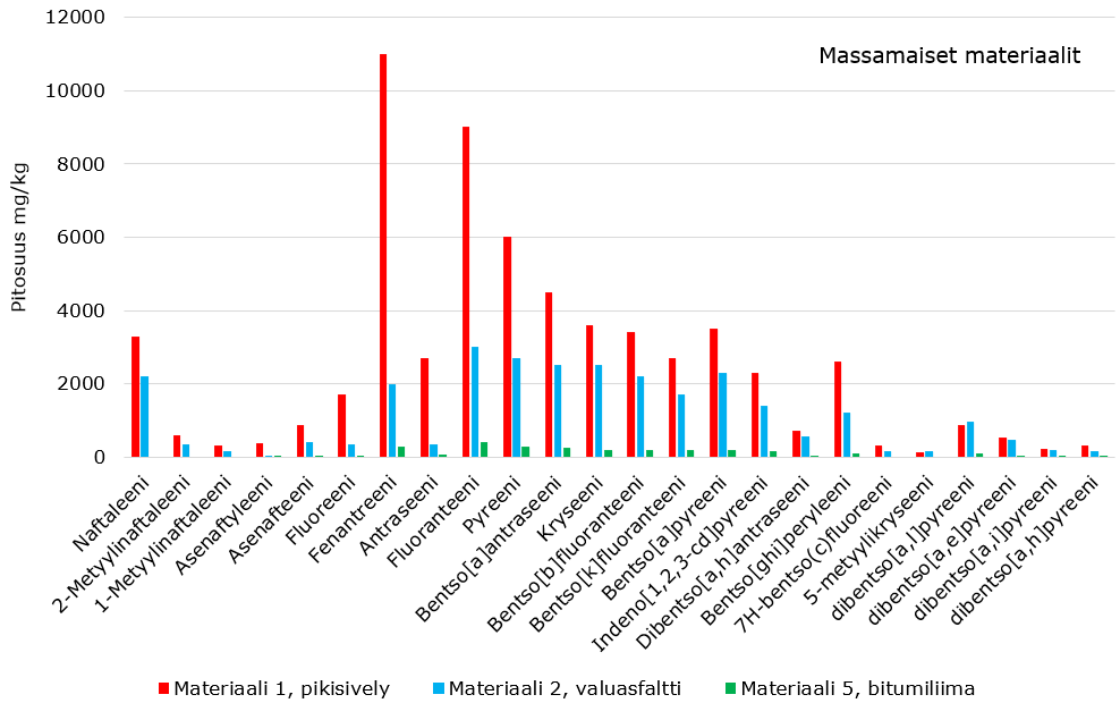
Tarkastelluista tiloista otettujen PAH-yhdistepitoisten materiaalinäytteiden PAH(16)-summapitoisuudet (mg/kg) on esitetty kuvassa 43. Tarkat yhdistekohtaiset mittaustulokset on esitetty alla kuvissa 41 ja 42 sekä taulukkomuodossa liitteessä 1.



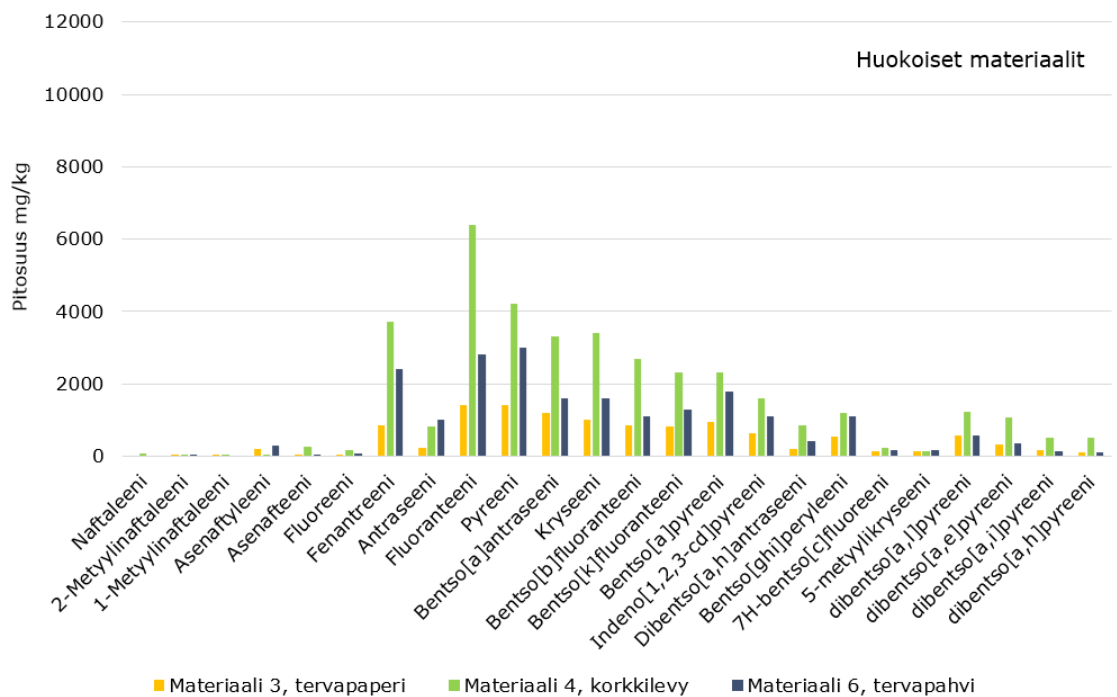
Kuva 43. Tutkittujen materiaalinäytteiden PAH(16)-summapitoisuudet (mg/kg). Materiaalit 1, 2 ja 5 ovat massamaisia, materiaalit 3, 4, ja 6 huokoisia materiaalityyppejä.

Materiaalinäytteiden PAH(16)-summapitoisuus oli viidessä näytteessä korkeahko, 11 000–59 000 mg/kg ja yhdessä näytteessä (Materiaali 5) melko matala, 2 400 mg/kg.

Rakennusmateriaalinäytteiden sisältämien yksittäisten PAH-yhdisteiden pitoisuudet on esitetty kuvissa 44 ja 45. Ensimmäisessä kuvaajassa on esitetty massamaisien materiaalien ja toisessa huokoisten materiaalien yhdistejakaumat. Kuvaajissa on mukana sekä PAH(16)-listan yhdisteet että sen ulkopuolelta analysoidut kahdeksan muuta PAH-yhdistettä.



Kuva 44. Tutkittujen massamaisten rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden pitoisuudet.



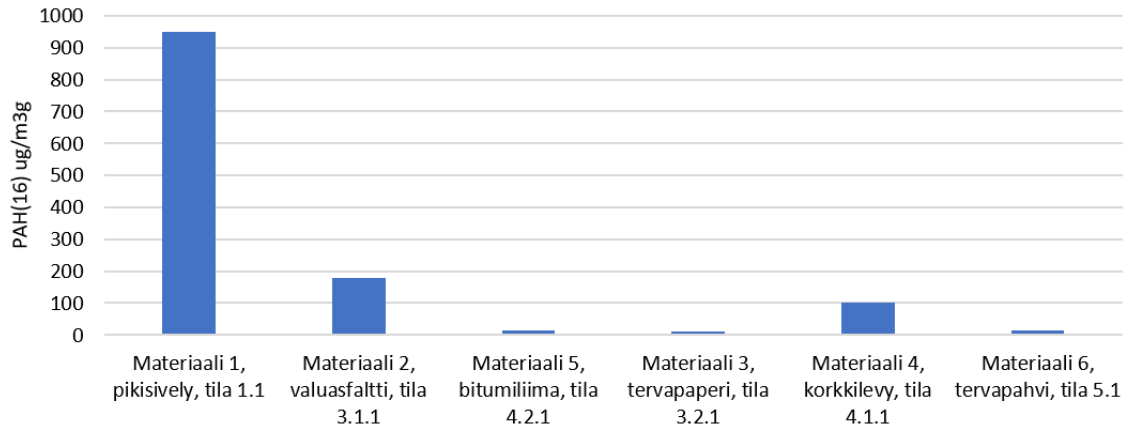
Kuva 45. Tutkittujen huokoisten rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden pitoisuudet.

Massamaisissa materiaalinäytteissä (näytteet 1 ja 2) herkästi haihtuvien PAH-yhdisteiden (naftaleeni-fluoreeni) pitoisuudet suhteessa raskaampiin PAH-yhdisteisiin olivat selvästi korkeampia kuin huokoisten materiaalien näytteissä (näytteet 3, 4 ja 6).

Materiaalinäyte 5 poikkesi selkeästi muista massamaisista näytteistä. Sen haihtuvien PAH-yhdisteiden pitoisuudet ovat matalia ja myös sen PAH(16)-summapitoisuus oli huomattavasti matalampi, kuin muilla näytteillä. Tulosten perusteella voidaan olettaa, että näytteen 5 pääasiallinen valmistusraaka-aine on ollut bitumipohjainen.

3.1.2 Materiaalien emissiopotentiaali (bulk)

Tarkastelluista tiloista otettujen PAH-yhdistepitoisten materiaalinäytteiden bulk-mikrokammioanalyysissä todetut PAH(16)-yhdisteiden summaemissiot on esitetty kuvassa 46. Tarkat mittaustulokset on esitetty liitteen 2 taulukoissa.

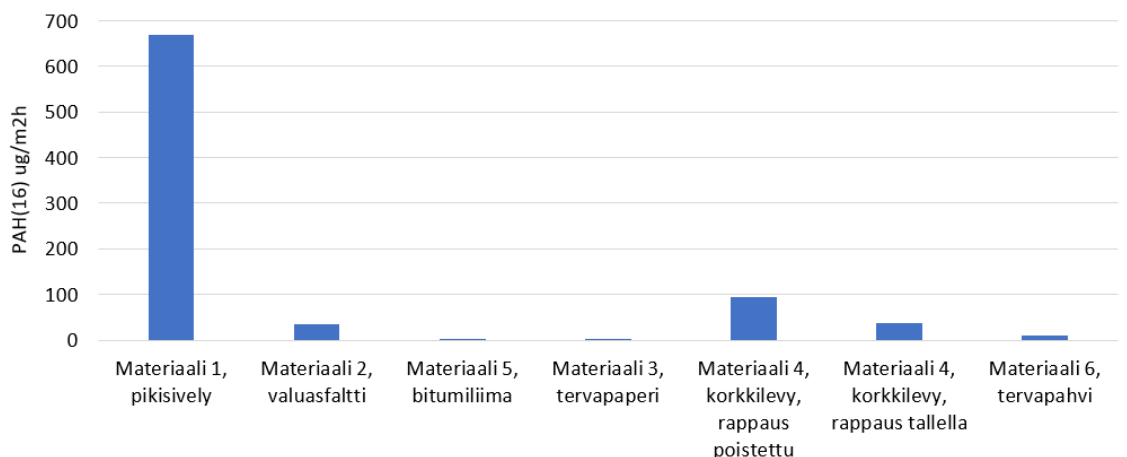


Kuva 46. Tutkittujen materiaalinäytteiden bulk-mikrokammioanalyysissä todetut PAH(16)-yhdisteiden summaemissiot ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$). Materiaalit 1, 2 ja 5 ovat massamaisia, materiaalit 3, 4, ja 6 huokoisia materiaalityyppejä.

Mikrokammiossa todetut bulk-emissiot vaihtelivat voimakkaasti, PAH(16)-yhdisteiden kokonaispäästö oli välillä 14–950 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$. Materiaalin PAH-yhdistepitoisuuden suhteutettuna massamaisten materiaalien päästö oli suhteessa huokoisia materiaaleja suurempi.

3.1.3 Materiaalien pintaemissiot (SER) koekammiossa

Tarkastelluista tiloista irrotettujen PAH-yhdistepitoisten materiaalikappaleiden emissiokammiossa tehtyjen pintaemissiomittausten (SER) PAH(16)-yhdisteiden summaemissiotulokset on esitetty kuvassa 47. Tarkat mittaustulokset on esitetty liitteen 3 taulukoissa.



Kuva 47. Kohteesta kokonaisina irrotettujen materiaalikappaleiden PAH(16)-yhdisteiden pintaemissioiden summat ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$). Materiaalit 1, 2 ja 5 ovat massamaisia, materiaalit 3, 4, ja 6 huokoisia materiaalityyppejä.

Tarkasteltujen materiaalien pintaemissiot kohteesta mahdollisimman ehjänä irrotettujen kappaleiden ehjiltä pinnoilta vaihtelivat voimakkaasti. PAH(16)-yhdisteiden kokonaispäästö oli materiaalista riippuen välillä 1–669 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$. Matalimmat päästöt mitattiin bitumiliimasta, tervapaperista ja tervapahvista ja suurimmat pikisivelistä. Materiaali 4, korkkilevy

analysoitiin sekä alkuperäisen suojaavan rappauserroksen kanssa että ilman sitä. Päästö voimelta pinnalta oli noin kolminkertainen ehjään pintaan verrattuna.

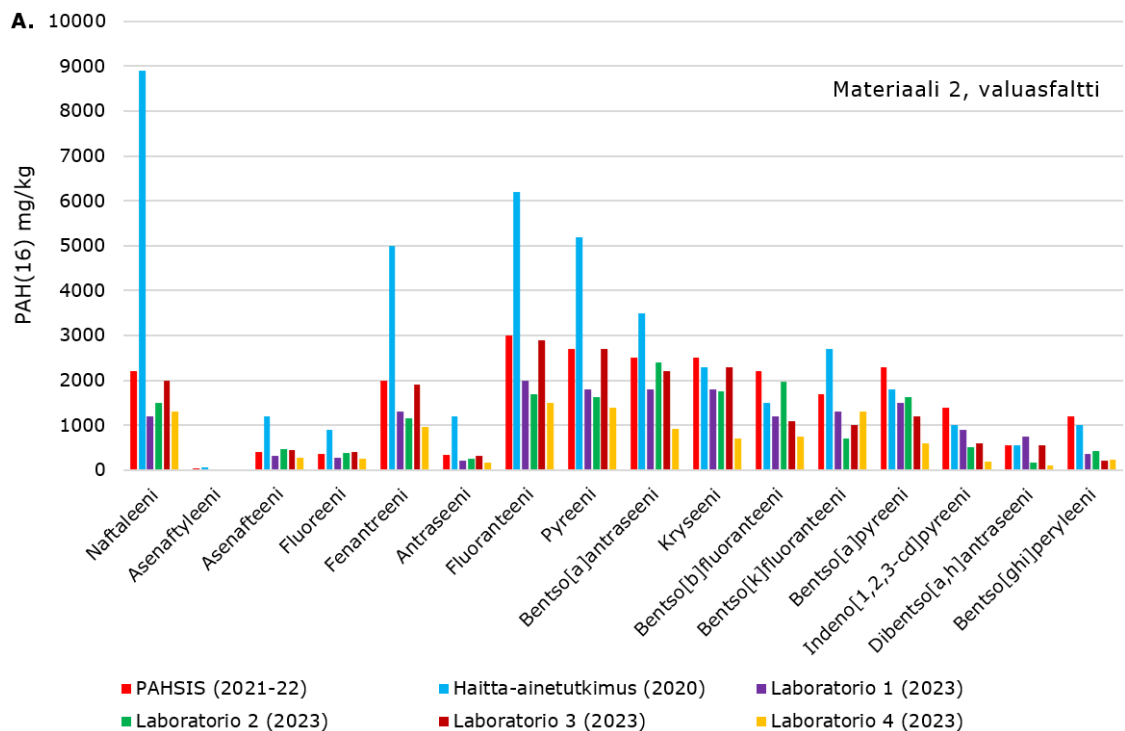
3.1.4 Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet, laboratorioiden välinen vaihtelu

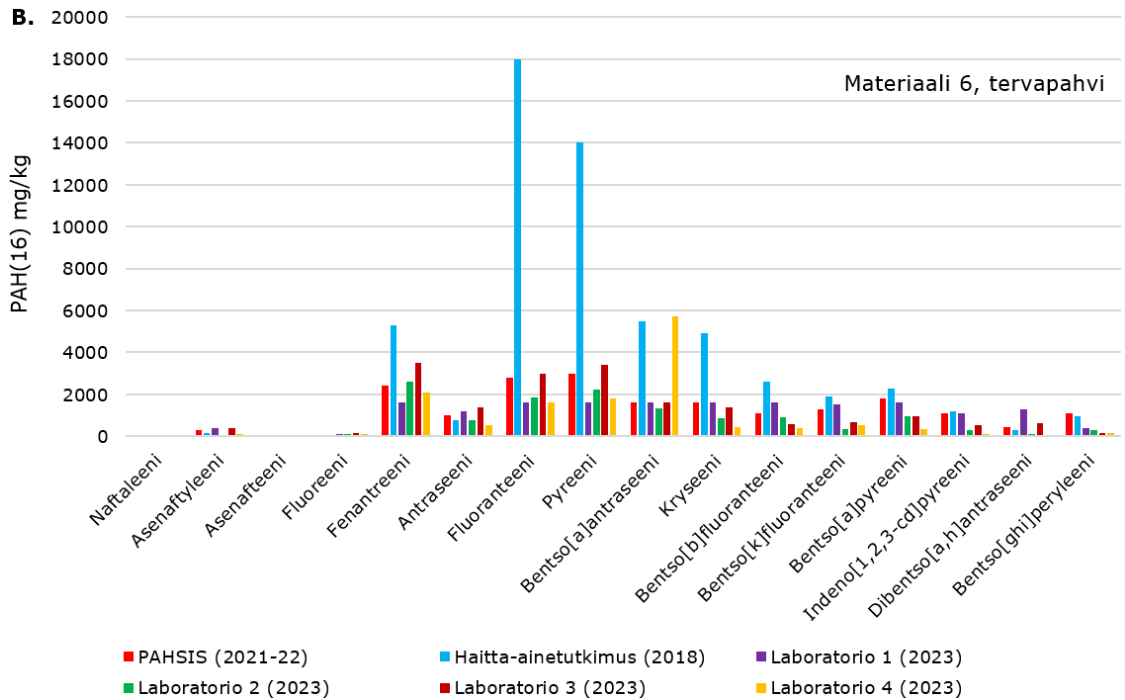
Kaikista tutkituista rakennusmateriaaleista oli saatavilla tässä hankkeessa tehdyn pitoisuus-analyysin lisäksi vähintään yksi PAH-yhdistepitoisuuden analyysitulokset eri laboratoriossa tutkittuna, tai samassa laboratoriossa eri aikaan tutkittuna. Vanhojen analyysitulosten lisäksi kahdelle näytteelle (näytteet 2 ja 6) tehtiin tässä tutkimuksessa erillinen vertailukoe neljässä laboratoriossa. Vertailukokeessa laboratorioille lähetettiin samasta, vuonna 2022 hankkeen yhteydessä otetusta ja pakastimessa säilytetystä näytteestä kaasutiiviisiin näytekupuihin jaetut osanäytepalat.

Kuvissa 48 A ja B on esitetty kahden materiaalinäytteen laboratoriovertailun tulokset. Vertailumittauksen tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

Vertailun perusteella materiaalinäytteiden PAH-yhdistepitoisuusanalyysin tulokset vaihtelivat osin voimakkaasti laboratorioittain.

Vuonna 2022 järjestetyssä laboratorioiden välisessä vertailukokeessa (Syke, 15/2023) todettiin tulokset hyväksyttäviksi, jos niiden keskihajonta oli 15–40 %. Vertailukokeessa tarkastellaan PAH(16)-summapitoisuutta. Tässä tutkimuksessa analyysituloksissa havaittiin osin huomattavasti suurempia eroja laboratorioiden välillä. Osittain tätä selittävät erot laboratorioiden menetelmien välillä (cut-off-arvot, laimennossarjojen määrät) sekä PAH-yhdistepitoisuuksien mahdollinen epähomogeenisuus näytteissä.



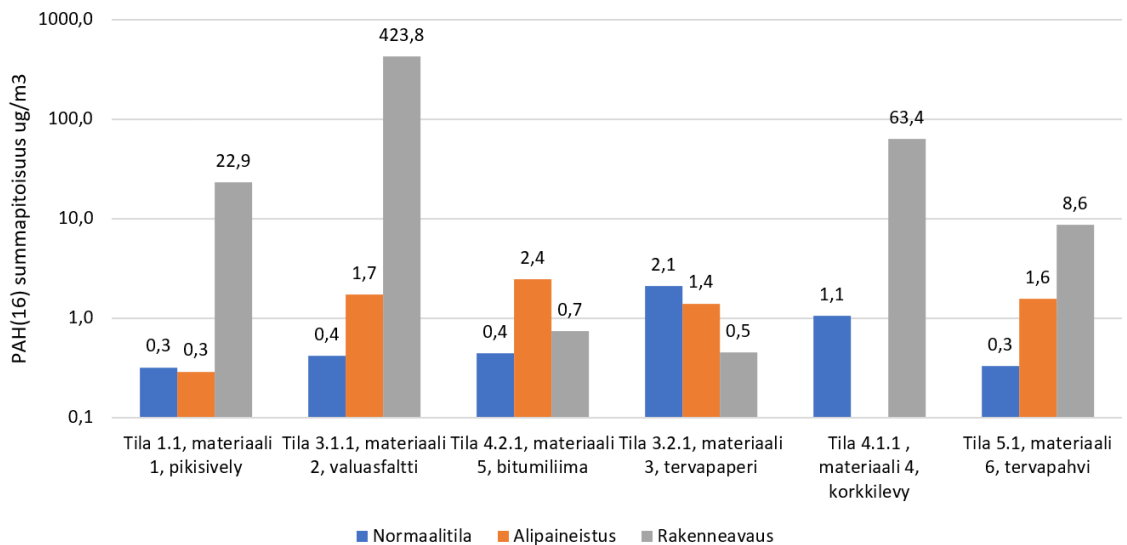


Kuvat 48 A ja B. Materiaalien 2 ja 6 PAH-yhdistepitoisuusanalyysien tulokset tässä tutkimuksessa ("PAHSIS2021-22"), vuonna 2020/2018 tehdyssä aikaisemmassa tutkimuksessa sekä tässä tutkimuksessa tehdyssä neljän laboratorion vertailukokeessa.

3.2 Kohdetilojen PAH-yhdisteiden sisäilmapitoisuudet

3.2.1 Tutkittujen tilojen sisäilmapitoisuudet eri olosuhteissa

Kuvassa 49 on esitetty tutkittujen tilojen sisäilman PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet eri olosuhteissa (normaalitilanteessa / alipaineessa / rakenneavauksen aikana). Näytteiden yhdistekirjot on esitetty kuvissa 50A ja 50B. Yksittäisten yhdisteiden pitoisuudet määrittäjärajoihin on esitetty kokonaisuudessaan taulukkomuodossa liitteessä 4.



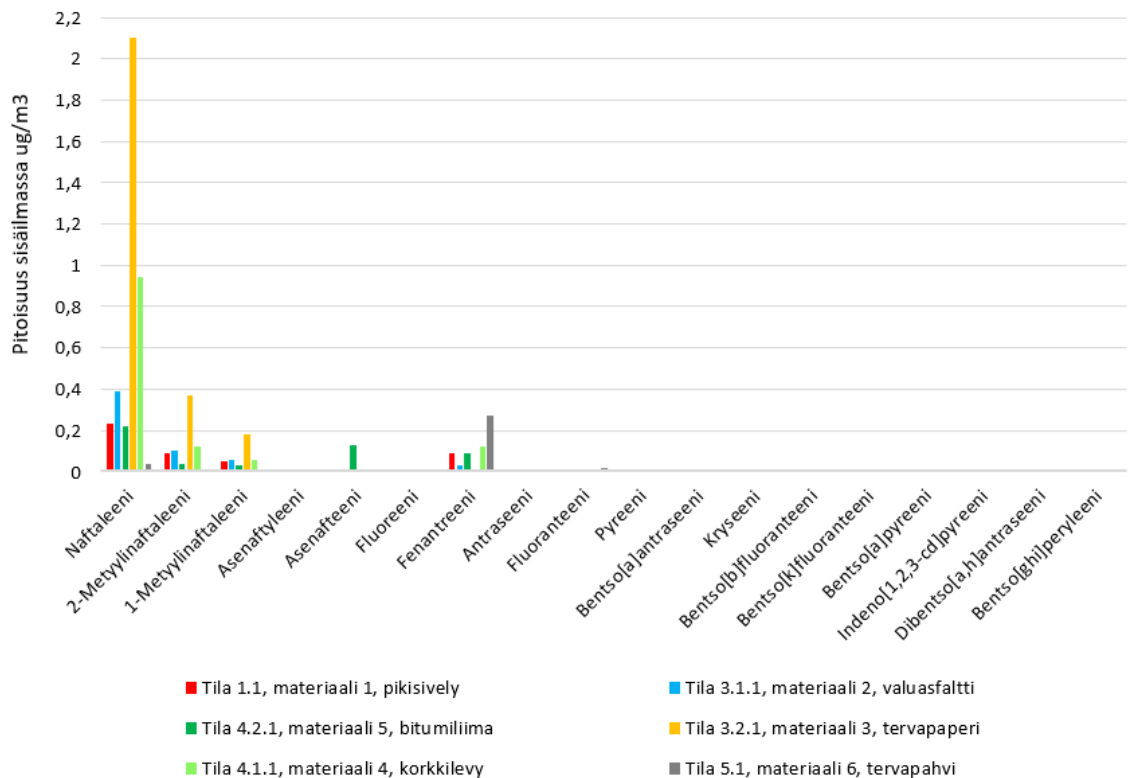
Kuva 49. Tutkittujen tilojen sisäilman PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet eri mittausolosuhteissa. Huomaa vertailussa y-akselin logaritminen asteikko. Tilasta 4.1.1 ei tehty alipainetilanteen mittausta.

Sisäilman PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet vaihtelivat normaalitilanteessa välillä 0,3–2,1 µg/m³.

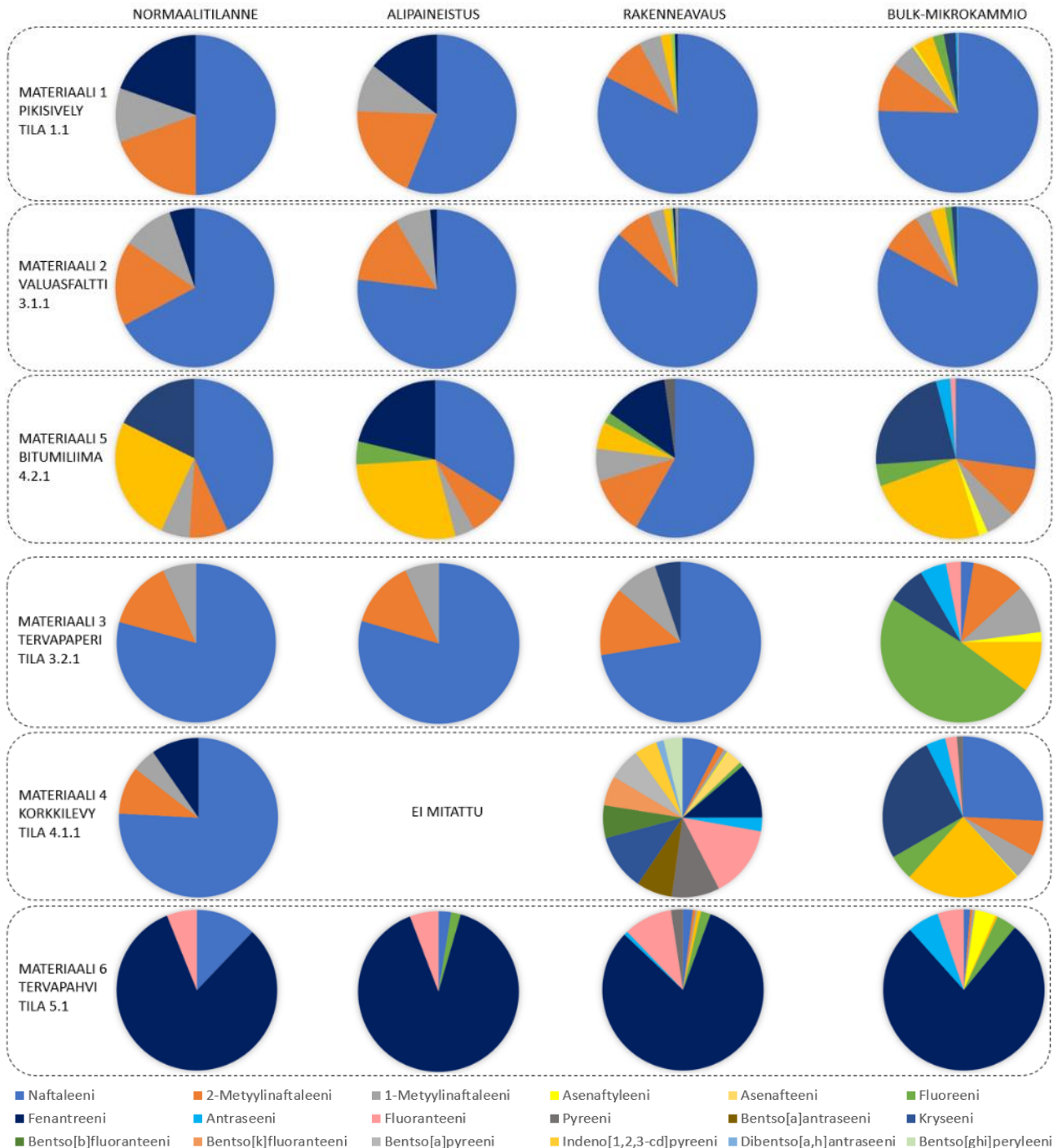
Alipaineistuksen aikana PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet nousivat useimmissa näytteessä noin 3–5-kertaisiksi normaalitilanteeseen verrattuna, tasolle 1,4–2,4 µg/m³. Kahdessa tilassa alipaineistus laski sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksia. Analyysin kokonaismitausepävarmuus huomioon ottaen, eroa ei voida pitää merkittävänä.

Rakenneavaustilanteessa PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet nousivat useimmissa tiloissa selvästi, tasolle 8,6–424 µg/m³. Voimakkain nousu tapahtui tilassa, jossa valuasfalttia irrotettiin vesijähdytteisellä timanttiorauksella. Kahdessa tilassa (materiaalit 5 ja 3) pitoisuus laski rakenneavauksen aikana. Näissä tiloissa materiaalin PAH-yhdistepitoisuus oli matalin.

Sisäilmasta mitattujen PAH-yhdisteiden kirjo on esitetty kuvissa 50A ja 50B. Kuvassa 50A on esitetty yksittäisten yhdisteiden sisäilmapitoisuudet tilojen normaalissa käyttötilanteessa. Kuvassa 50B on esitetty tutkittujen tilojen sisäilmasta eri olosuhteissa (normaali/alipaine/rakenneavaus) todetut PAH-yhdistekirjot suhteellisina osuuksina, ilman pitoisuustietoja. Kuvan 50B oikeassa reunassa on lisäksi vertailuna kunkin tilan PAH-yhdistepitoisen materiaalin bulk-mikrokammionäytteissä todettu PAH-yhdistekirjo, joka edustaa kyseisessä tilassa olleen PAH-yhdistepitoisen materiaalin emissiopotentiaalia.



Kuva 50A. Tutkittujen tilojen sisäilmasta mitatut yksittäisten PAH-yhdisteiden pitoisuudet.



Kuva 50. Tutkittujen tilojen sisäilman PAH-yhdistekirjot eri mittausolosuhteissa (normaalitilanne, alipaineistus, rakennevaus). Kuvan oikeassa laidassa on lisäksi vertailuna bulk-mikrokammioanalyysin tulokset (emissipotentiaali) kunkin tilan PAH-yhdistepitoisesta materiaalista.

Normaalitilanteessa viiden tilan sisäilman PAH-yhdisteiden pääkomponenttina oli naftaleeni. Naftaleenipitoisuudet olivat normaalitilanteessa 0,2–2,1 µg/m³. Metyyli-naftaleeneja ja fenantreenia esiintyi myös yleisesti. Yhdessä tilassa (tila 5.1) pääkomponenttina oli fenantreeni. Normaalitilanteessa ei todettu hiukkasmaisia PAH-yhdisteitä määräysrajan ylittävinä pitoisuuksina. Yhdessä näytteessä (tila 5.1) todettiin hyvin pienenä pitoisuutena puolihihuttavaa fluoranteenia.

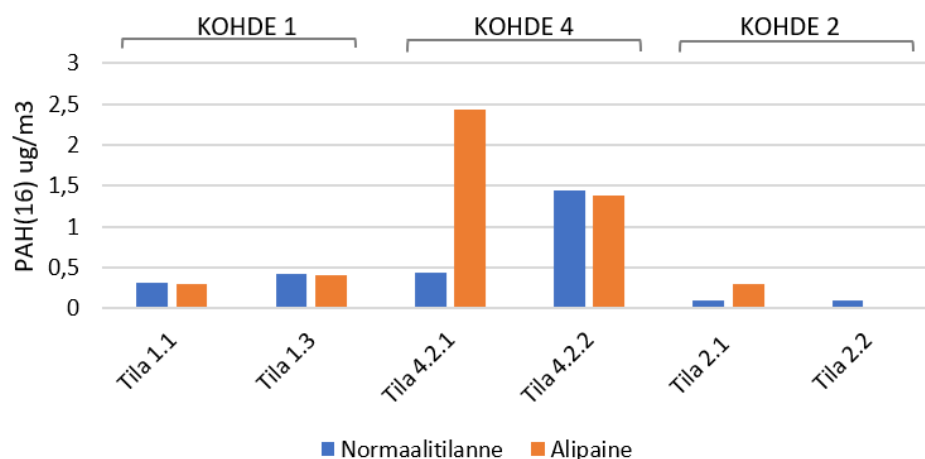
Alipainetilanteessa sisäilman PAH-yhdistekirjossa ei tapahtunut suuria muutoksia. Rakenneavauksen aikana sisäilmasta mitattiin yleensä suurempi kirjo PAH-yhdisteitä. Yhdistekirjo kuvasti pääosin materiaalinäytteiden bulk-emissionalyysissä todettua materiaalin emisio potentiaalia. Poikkeuksena oli tila 3.2.1, jossa materiaalin 3 (tervapaperi) kokonaisemission PAH-yhdistekirjo erosi selvästi sisäilmasta mitatusta yhdistekirjosta. Tulosten perusteella tilan sisäilmasta mitatut PAH-yhdisteet olivat pääosin peräisin tilan ulkopuolelta. Mittaustulos oli odotettava, sillä tilaan havaittiin kulkeutuvan tutkimuksen aikana PAH-yhdisteiden hajua muista tiloista/rakenteista, mahdollisesti kellarista, jossa oli samaa valuasfalttia kuin tilassa 3.1.1, jossa sekä sisäilman että materiaalin bulk-emissionäytteen yhdistekirjo muistuttivat huomattavan paljon tilan 3.2.1 sisäilman yhdistekirjoa. Vertailun perusteella tilan 3.2.1 materiaalilla 3 ei ollut merkittävää vaikutusta tilan sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin.

Normaalista käyttötilanteesta, ja myös bulk-analyysin tuloksista poiketen rakenneavausten aikana kohteiden sisäilmassa todettiin myös hiukkasfaasin PAH-yhdisteitä. Tämä oli erityisen selvää materiaalin 4 (korkkilevy) osalta, joka tuotti rakenneavauksen aikana sisäilmaan selvästi bulk-emissionmittauksella todettua suuremman yhdistekirjon, mukaan lukien raskaampia yhdisteitä pyreenistä bentso[ghi]peryleeniin.

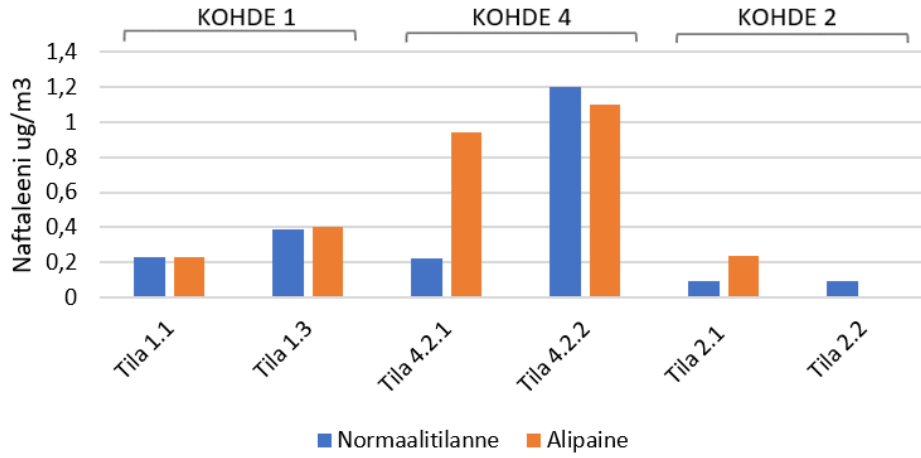
3.2.2 Tilojen välinen vaihtelu

Kohteista 1, 2, 4 ja 5 kerättiin sisäilmanäytteitä useista rinnakkaisista tiloista. Näytteet otettiin sekä normaalitilanteesta että alipainetilanteesta. Tutkittujen tilojen olosuhteet poikkesivat osin tavanomaisesta: kohteessa 2 sisäilman lämpötila oli mittausten aikaan matala, vain 6,4 °C. Tila 4.2.2 oli normaalitilanteesta noin -30 Pa alipaineinen, alipaineistustilanteesta ilmanvaihto oli pois päältä ja paine-ero n. -3...-12 Pa. Kohteessa 5 alkuperäinen sisäilmanäytteenotto tehtiin melko viileissä olosuhteissa (lämpötila 7,5...16 °C). Näytteenotto toistettiin uudelleen noin kolme kuukautta alkuperäisestä tutkimuksesta sään ollessa helteinen ja kostea (sisälämpötila 22,5–27 °C välillä, ks. kohta 3.3.2 *Lämpötila ja ilmankosteus*). Kohteen PAH-yhdistepitoinen materiaali on ulkoseinärakenteen ulko-osassa, johon ulkoilman lämpötila ja auringon säteily vaikuttavat voimakkaasti.

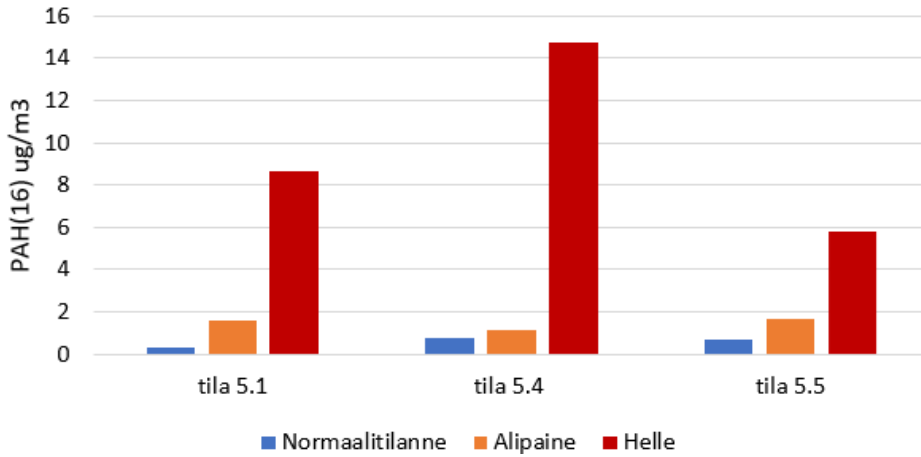
Tulokset kohteista 1, 2 ja 4 on esitetty kuvissa 51 (PAH(16)-yhdisteiden summakonsentraatio) ja 52 (naftaleenin pitoisuudet). Kohteen 5 mittaustulokset on esitetty kuvissa 53 (PAH(16)-yhdisteiden summakonsentraatio) ja 54 (PAH-yhdistekirjot). Tarkat mittaustulokset on esitetty liitteen 5 taulukoissa.



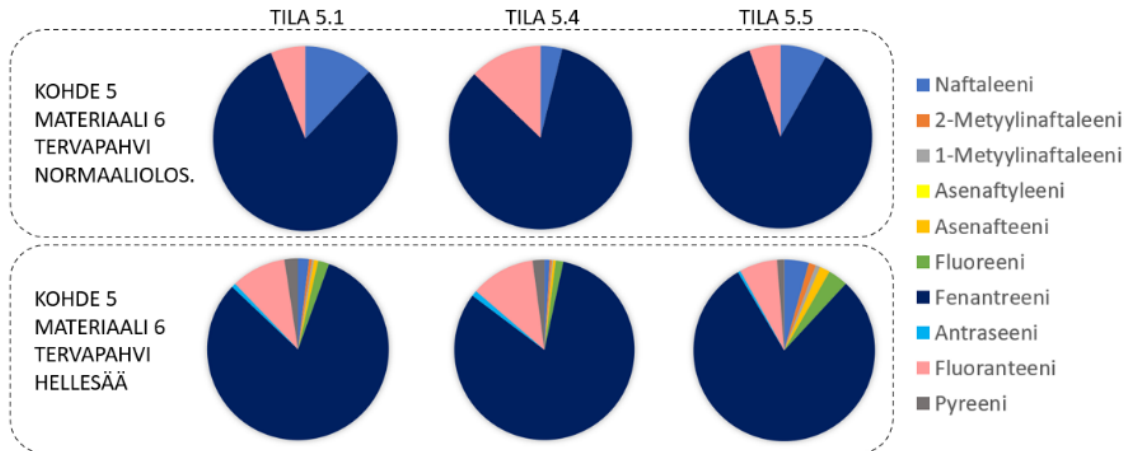
Kuva 51. Rinnakkaisten sisäilmanäytteiden PAH(16)-mittaustulokset kohteista 1, 2 ja 4.



Kuva 52. Rinnakkaisten sisäilmanäytteiden naftaleenin mittaustulokset kohteista 1, 2 ja 4.



Kuva 53. Rinnakkaisten sisäilmanäytteiden PAH(16)-mittaustulokset kohteesta 5. Kuvassa on esitetty normaalitilanteen ja alipainetilanteen tulokset, sekä myöhemmin hellesäällä otettujen näytteiden tulokset.



Kuva 54. Rinnakkaisten sisäilmanäytteiden yhdistekirjot normaaleissa olosuhteissa ja hellesäällä toteutetussa näytteenotossa kohteesta 5.

3.3 Kohdetilojen olosuhteet

Kappaleissa 3.1.1–3.1.5 on esitetty tutkittujen tilojen aistinvaraiset havainnot ja olosuhdemittausten tulokset. Rakennusmateriaalit on jaoteltu käsittelyä varten ”massamaisiin” ja ”huokoisiin” materiaaleihin.

Tuloksissa on esitetty tietoja ensisijaisten kohdetilojen lisäksi tiloista, joista otettiin ilmanäytteiden rinnakkaismittauksia (vrt. kohta 3.2.2 *Tilojen välinen vaihtelu*).

3.3.1 Aistinvaraisesti arvioitu sisäilmanlaatu

Tutkimusten yhteydessä eri olosuhteissa (normaalitilanne / alipaineessa / rakenteen avauksen aikana) tehdyt aistinvaraiset arviot on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Havainnot on esitetty erikseen tiloille, joissa oli massamaisia (taulukko 9) ja huokoisia materiaaleja (taulukko 10). Arviointiperusteet ja -tavat on esitetty kappaleessa 2.3.1.

Tarkasteltujen tilojen yleisilmassa ei normaalitilanteessa pääosin havaittu selvää PAH-yhdisteiden hajua. Pääosassa tiloja PAH-yhdisteisiin viittaavaa hajua aistittiin ajoittain lievänä tai paikallisina ”leahduksina”. Aistinvaraisesti arvioituna useissa tiloissa hajun ilmenemiseen vaikuttivat voimakkaasti tilan ilmanvaihto, rakennepintojen eheys ja sisätilan lämpöolosuhteet. Alipainetilanteessa hajuhavainnot olivat hieman yleisempiä, mutta pääosin eivät edelleenkään selviä tai häiritseviä. Rakenteiden avaamisen jälkeen PAH-yhdisteiden hajua muuttui yleisesti selväksi tai voimakkaaksi ja hieman tai erittäin häiritseväksi.

3.3.2 Lämpötila ja ilmankosteus

Näytteenottojen yhteydessä mitatut lämpötilat ja ilmankosteudet on esitetty taulukossa 11. Tuloksissa on esitetty joko hetkellinen sisä-/ulkolämpötilan mittaustulos tai lämpötilan vaihteluväli tutkimusajankohtana (normaalitilanteen ja alipaineessa tehdyn sisäilmamittauksen aikana).

Taulukossa esitettyjen mittaustilanteiden lisäksi kerättiin sisäilmanäytteitä kahdesta kohteesta varsinaisen näytteenottokampanjan ulkopuolella, jolloin olosuhteet erosivat taulukossa esitetyistä. Kohteessa 2, joka jouduttiin jättämään pääosin pois tutkimuksesta (ks. kohta 2.2.2 *Kohde 2*) kerättiin normaalitilanteen ja alipainetilanteen sisäilmanäytteet. Rakennuksen sisälämpötila oli noin 6,5 °C ja ilmankosteus noin 58,3 %RH. Kohteessa 5 (materiaali 6) kerättiin varsinaisten näytteiden lisäksi hellesään vertailunäytteet 07/2022 eli noin 3 kk alkuperäisestä tutkimuksesta. Näytteenoton aikaan lämpötila oli välillä 22,5–24,9 °C (paikallisesti 26–27 °C) ja suhteellinen kosteus välillä 60–73 RH%. Rakennuksen sisälämpötilan ja kosteusolosuhteiden arvioitiin mukailleen tutkimusten aikaan pitkälti ulkoilman olosuhteita. Lämmin ulkoilma ja auringon säteily lämmittivät ulkoseiniä, jossa tarkasteltava materiaali oli.

Materiaalien 1, 2, 5, 3 ja 4 osalta ero lämpöolosuhteissa normaalitilanteen sisäilmamittauksen ja alipaineessa tehdyn mittauksen välillä oli pieni, eikä ole vaikuttanut merkittävästi materiaali-päästöihin. Lämpötilat olivat tavanomaisia huonelämpötiloja tai lähellä niitä, joten sisäilmasta tehtyjen mittausten tulosten voidaan arvioida edustavan kyseisen rakenteen tyyppistä päästöä tältä osin. Materiaalin 6 osalta materiaalia ympäröivä rakenne oli hankkeen mittausten aikaan viileä. Lämpötila oli alipainetilanteessa jonkin verran normaalitilanteen mittausta korkeampi, mistä syystä materiaali-päästö on voinut olla alipainetilanteessa jonkin verran normaalitilannetta suurempi. Päästöt materiaalista 6 olivat korkeamassa lämpötilassa merkittävästi suuremmat hellesäällä tehtyjen vertailumittausten perusteella.

Taulukko 9. Tutkimusten yhteydessä tehdyt aistinvaraiset havainnot, massamaiset materiaalit.

Tila, materiaali	Tila 1.1 Materiaali 1, pikisively			Tila 3.1.1 Materiaali 2, valuasfaltti			Tila 4.2.1 Materiaali 5, bitumiliima		
	Norm.	Alip.	Avaus	Norm.	Alip.	Avaus	Norm.	Alip.	Avaus
Hajun voimakkuus	0	0-1	3	0-1	0-1	3	0-1	2	1
Hajun kuvaus	-	A	D	A	A	A/C/D	A	B	B/D
Hajun häiritsevyys	*	*	***	*	*	***	*	**	*
Muita huomiota PAH-yhdisteisiin viittaavista hajusta	Voimakasta PAH-yhdisteiden hajua levisi tilan 1.1 alapohjan rakenneavauksen yhteydessä osastosta mahdollisesti putkikanaalin kautta tilaan 1.3.			Kellarissa ja tilassa 3.1.1 oli ensimmäisellä käynnillä avonaisia rakenneavauksia, joista aiheutui selviä / ajoittain voimakkaita PAH-lehahduksia. Avaukset paikattiin ja rikkinäiset pinnat kapseloitiin ennen tutkimuksia. Kapselointia edeltäviä hajuja ei ole huomioitu tässä raportissa.			Osassa vastaavaa bitumiliimaa sisältäviä huoneita havaittiin hetkellisiä "PAH-lehahduksia" ikkunan/patterin edustalla. Alipaineistuksessa tilaan 4.2.1 ja sen ympärille levisi voimakas savua muistuttava (mutta selvästi PAH-yhdisteisiin viittaava) haju, joka oli erityyppinen kuin bitumiliimassa todettu. Oletuksena oli, että haju tuli tutkittavan tilan rakenteista, mahdollisesti savuhormeista.		

Taulukko 10. Tutkimusten yhteydessä tehdyt aistinvaraiset havainnot, huokoiset materiaalit.

Tila, materiaali	Tila 3.2.1 Materiaali 3, tervapaperi			Tila 4.1.1 Materiaali 4, korkkilevy			Tila 5.1 Materiaali 6, tervapahvi		
	Norm.	Alip.	Avaus	Norm.	Alip.	Avaus	Norm.	Alip.	Avaus
Hajun voimakkuus	0	0-1	1	1	-	2	0-1	0-1	2-3
Hajun kuvaus	-	A	A	D	-	D	A	A	A
Hajun häiritsevyys	*	*	*	**	-	***	*	*	**
Muita huomiota PAH-yhdisteisiin viittaavista hajusta	Tilan viereiseen porrashuoneeseen kulkeutui PAH-yhdisteiden hajua muualta rakennuksesta. Alipaineessa ei tutkimuksessa tilassa havaittu juurikaan muutosta hajuun, rakenneavauksessa hyvin vähäinen PAH-yhdisteisiin viittaava haju.			Mahdollinen PAH-yhdisteiden haju ei selvästi erottuvaa, koska kellarissa oli runsaasti muita hajuja. Pienikin vaurio korkkilevyn aiheutti voimakkaan, pistävän PAH-yhdisteisiin viittaavan hajun. Korkkieristeen lähellä oli useita putkilinjoja, jotka voivat lämmittää pintaa ja korostaa hajuja/ haihtumista paikallisesti.			Tilan väliovien pitäminen kiinni aiheutti tilaan lievän, mutta selvästi aistittavan "ratapölkymäisen", hiukan savua muistuttavan hajun normaalitilanteessa sekä alipaineistuksen jälkeen arvioituna. Toisessa tilassa, jossa seinän pintarakenne oli auki, oli havaittavissa selvä PAH-yhdisteiden haju. Kohteessa 5 käytiin myös keuhkokuumeella 2022 "hellekeliä", jolloin lämmin sää ja ovien sulkemisen korostivat hajuaihtumuksia: 1-2A**.		

Taulukko 11. Tutkimusten yhteydessä mitatut lämpötilat ja ilmankosteudet.

Tila, materiaali	Tilat 1.1 ja 1.3 Materiaali 1, pikisively	Tila 3.1.1 Materiaali 2, valuasfaltti	Tilat 4.2.1 ja 4.2.2 Materiaali 5, bitumiliima	Tila 3.2.1 Materiaali 3, tervapaperi	Tila 4.1.1 Materiaali 4, korkkilevy	Tilat 5.1, 5.4 ja 5.5 Materiaali 6, tervapahvi
	Massamaiset materiaalit			Huokoiset materiaalit		
Tutkimusajan kohta	11/2021	01/2022	01/2022	01/2022	01/2022	04/2022
Sisäilma [°C]	22,1...25,0	18,9...21,2	20,5...22,1	19...20,3	24	7,5...16
Ulkoilma [°C]	0...8	2...6,5	1...3,5	2...6,5	1...3,5	0...10
PAH-yhdistepitoisuuden materiaalin pinta [°C]	21,0	~17-18	~23	19,5	24,5	3...4 (mitattu ulkopuolelta)
Sisäilma [%RH]	23,0-32,0	41,5	28,6...30,1	31,5...35,5	36,0	35,4-56,2
Sisäilman kosteuslisä [g/m ³]	~1	~1-2	~1	~1	~3	~1

Tutkittujen tilojen ilmankosteus oli vuodenajalle tavanomaisella tasolla, eikä normaali- ja alipainetilanteiden välillä ollut merkittävää eroa. Kosteusolosuhteiden ei arvioitu vaikuttaneen materiaalipäästöihin tavanomaisesta poikkeavalla tavalla.

3.3.3 Ilmanvaihdon toiminta

Taulukoissa 12 ja 13 on esitetty tilojen ilmanvaihtoon liittyvät havainnot ja mittaustulokset.

Taulukko 12. Ilmanvaihdon tiedot tiloista, joissa oli käytetty massamaisia tuotteita.

Tila, materiaali	Tila 1.1 Materiaali 1, pikisively	Tila 3.1.1 Materiaali 2, valuasfaltti	Tila 4.2.1 Materiaali 5, bitumiliima
IV-järjestelmän tyyppi	Erillinen tulo-/poistoilmakone (tilassa 1.3)	Koneellinen tulo/poisto	Koneellinen tulo/poisto
Viilennys / erilliset puhallinlaitteet	-	-	-
Tuloilmamäärä, l/s	Ei tietoa*	Ei tietoa*	+30
Poistoilmamäärä, l/s	Ei tietoa*	Ei tietoa*	-30
Ilmanjaon toimivuus	Heikko	Välttävä	Melko hyvä
Ilmanvaihtokerroin 1/h tai arvio ilmanvaihdon toimivuudesta	Ei tietoa	Ei tietoa	1,5 1/h
Arvioitu ilmanlaatu	Ilma tunkkainen	Ilma hiukan tunkkaista, mutta viileää	Melko hyvä
Muita huomioita	*Tiloja 1.1–1.3 palveleva erillinen ilmanvaihtokone oli tutkimusten aikaan rikki ja tilat olivat tunkkaisia ja lämpimiä. Tilassa 1.1 poistoilmaventtiili, joka oli havaintojen perusteella toiminnassa.	*Ilmanvaihtojärjestelmän tulopuoli oli ollut poissa toiminnasta 2019 alkaen ”kellarin alipaineistuksen tehostamiseksi”. Tarkoituksena ollut estää kellarin hajujen kulkeutuminen ylempiin kerroksiin. Tutkittuun tilaan tuleva korvausilma on todennäköisesti suurelta osin peräisin mm. maanvastaisten ulkoseinien epätiiviestä liittymistä / viereisistä tiloista. Maantasossa mahdollisesti yksi korvausilmasäleikkö, jonka toimivuudesta ei ole tietoa.	Tutkitussa tilassa / kerroksessa oli ajoittain hyvin kuuma ja ilmanvaihtoa tehostettiin käyttäjien toimesta ajoittain ikkunatuuletuksella. Tilasta 4.2.1 oli yhteys keittiöön ja wc-tilaan, jossa oli poistoilmaventtiili. Rinnakkaisnäytteitä otettiin myös tilasta 4.2.2. ”Normaaliolosuhteissa” tila 4.2.2 oli ilmanvaihdon toiminnan takia 30 Pa alipainen, erillinen tulo-poistoilmakone viereisessä tilassa oli täydellä teholla, eikä se ollut säädettävissä. Alipaineistuksen tulokset kuvaavat tilannetta, jossa ilmanvaihto oli väliaikaisesti pois päältä, jolloin tila oli 3–12 Pa alipainen ulkoilmaan.

Taulukko 13. Ilmanvaihdon tiedot tiloista, joissa oli käytetty huokoisia tuotteita.

Tila, materiaali	Tila 3.2.1 Materiaali 3, tervapaperi	Tila 4.1.1 Materiaali 4, korkkilevy	Tila 5.1 Materiaali 6, tervapahvi
IV-järjestelmän tyyppi	Koneellinen tulo/poisto	Koneellinen tulo/poisto	Painovoimainen
Viilennys / erilliset puhallinlaitteet	Erillinen jäähdytys	-	-
Tuloilmamäärä [l/s]	-	-	-
Poistoilmamäärä [l/s]	-	-	-
Ilmanjaon toimivuus	Kohtalainen, tulo-poisto vierekkäin	Heikko/tydyttävä	Heikko
Ilmanvaihtokerroin [1/h]	-	-	-
Muita huomioita	Tilassa melko viileää, vedon tunnetta.	Tilassa tukalan kuumaa ja hiostavaa.	Tilassa tunkkaista, rakennuksessa ei ollut toiminnassa olevia korvausilma-venttiileitä. Poisto tapahtuu kaakeliuunien kautta hormeihin. Hormit olivat ilmeisesti auki, tulipesiä ei käytetty.

Tutkittujen tilojen ilmanvaihdon toimivuus vaihteli. Viittä tutkittua tilaa palveli koneellinen tulo-poistoilmanvaihto, joskin yhdessä näistä kone oli rikki ja yhdessä tilassa tuloilmaa ei tullut lainkaan. Yhdessä tilassa oli painovoimainen ilmanvaihto ilman toimivia korvausilma-venttiileitä. Neljässä tilassa ilmanvaihto arvioitiin kokonaisuutena heikoksi, kahdessa melko hyväksi tai kohtalaiseksi. Pääosin voidaan arvioida, että ilmanvaihto ei tutkimuskohteissa ollut nykymääräysten tasolla, eikä laimentanut tehokkaasti sisäilman epäpuhtauksia.

3.3.4 Painesuhteet ja ilmatiiveys

Taulukossa 14 on esitetty massamaisia ja taulukossa 15 huokoisia rakennusmateriaaleja sisältävien tilojen painesuhteiden mittaustulokset ja havainnot PAH-yhdistepitoisen rakenteen ilmatiiveydestä.

Tutkitut tilat olivat pääosin lievästi ali- tai ylipaineisia ulkovaipan yli. Kaikista kohteista painesuhteita ei saatu mitattua. Normaalitylanteessa alipaineisuus ei tulosten perusteella ollut merkittävä epäpuhtauksien kulkeutumista voimistava tekijä. Alipaineistustilanteessa ja rakenteita osastoituna avattaessa kaikkiin tiloihin saatiin luotua tasainen $\sim -10.. -15$ Pa alipaine. PAH-yhdistepitoisen rakennekerroksen ja sisäilman välinen rakenne oli tutkituissa tiloissa pääosin vanhoille rakennuksille tavanomaisella melko heikolla tasolla. Rakenteita ei ollut erikseen tiivistetty. Rakenteiden tiiveys arvioitiin tavanomaiseksi, eikä sisäpintojen tiiveyden erityisesti arvioitu rajoittavan epäpuhtauksien kulkeutumista rakenteista sisäilmaan.

Taulukko 14. Painesuhteiden mittaustulokset ja muut havainnot tiloista, joissa oli käytetty massamaisia tuotteita.

Tila, materiaali	Tila 1.1 Materiaali 1, pikisively	Tila 3.1.1 Materiaali 2, valuasfaltti	Tila 4.2.1 Materiaali 5, bitumiliima
Normaalitilanne ulkovaipan yli [Pa]	0,2... -2 ulkovaipan yli*	~ -3...-10*	-1... +2,2
Alipaineistus [Pa]	~ -13	~ -13 (viereiseen tilaan 3.1.2)	~ -13
Rakenteen avaus [Pa]	~ -12... -15	~ -10... -13	~ -10... -15 (tila 4.2.3)
PAH-yhdistepitoisen rakenteen pinnan ilmatiiveys (arvio)	Tiivis, pintalaatta pääosin yhtenäinen, maalattu betoni (pieniä halkeamia), Tilan 1.2/1.3 kynnyksen kohdalla kuitenkin merkittävää ilmapuotoa alapohjan putkikanaalista huonetilaan (merkisavulla arvioituna).	Kohtalaisen tiivis. Valuasfaltin pinnalla oleva rappaus / maalipinta kohtalaisen yhtenäinen, pientä (mikro)halkeilua kuitenkin runsaasti. Tutkitun rakenteen (perustukset / massiivitiilimuraus) läpi ei todennäköistä merkittävää ilmapuotoa. Alapohjan betonilaatan ja seinien liittymät selvästi epätiivit.	Epätiivis. Bitumiliimalla kiinnitetty sauvaparketti oli yleisesti hyvin epätiivis. Kaksoislaattapalkistovälipohjan ontelotilasta vaihtelevasti ilmavirta huonetilaan tai rakenteeseen (rakenteeseen havainnoituna).
Muita huomiota	* Tilasta 1.1 ei mittausmahdollisuutta ulkoilmaan. Tilojen 1.1/1.3 välillä paine-ero ~0 Pa. Paine-ero ulkovaipan yli tilasta 1.3 mitattuna keskimäärin -2 Pa. Putkikanaalissa (sykleissä?) toimiva alipaineistus, jonka ollessa päällä kanaali oli alipaineinen. Muutoin selvää ilmapuotoa kanaalista huonetilaan. Alapohjan pikikerroksesta oli mahdollinen ilmayhteys putkikanaaliin, josta epätiivien liittymien kautta mahdollinen ilmayhteys sisätilaan.	*Tilasta 3.1.1 ei mittausmahdollisuutta ulkoilmaan. Kellarin toisella puolella sijainneesta tilasta 3.1.3 ulkovaipan yli mitattu paine-ero -5 Pa.	Tilan ikkunoiden tiiveys heikko ja tilasta 2 ovea viereisiin tiloihin, ovien tiiveys kohtalainen. Välipohjan tiiveys betonirakenteen osalta hyvä, parketin ilmatiiveys heikko. Tilan alueella myös mahdollisia vanhoja (savu)hormeja. Tilassa 4.2.2 ilmatiiveys oli vastaava kuin tilassa 4.2.1.

Taulukko 15. Painesuhteiden mittaustulokset ja muut havainnot tiloista, joissa oli käytetty huokoisia tuotteita.

Tila, materiaali	Tila 3.2.1 Materiaali 3, tervapaperi	Tila 4.2.1 Materiaali 4, korkkilevy	Tila 5.1 Materiaali 6, tervapahvi
Normaalitilanne [Pa]	-1,5 (+0,5...-10)	-	+2...-2,5
Alipaineistus [Pa]	-13	-	-13
Rakenteen avaus [Pa]	~-10...-15	~-10...-15 (osasto)	-
Rakenteen ilmatiiveys (arvio)	Melko heikko.	Heikko/kohtalainen.	Heikko.
Muita huomiota	Runsasta halkeilua sisäpinnan rappauksessa, kuonabetoni osin huokoista. Tilan ikkunat hyvin epätiivit ja porrashuoneesta kulkeutuu ilmaa huonetilaan.	Runsaasti epätiivit läpivientejä eri rakenteissa. Kellari lievästi alipaineinen suhteessa ylempiin kerroksiin.	Painesuhteet vaihtelivat suuresti tuulen vaikutuksen mukaan. Ulkoseinärakenne, ikkunat, ala- ja välipohjien liittymät hyvin epätiivit. Sisäpinnan materiaalit (pinnopahvi/tapetit/kovalevyt) osin rikkonaisia.

3.4 Naftaleenin hajukynnyksen määrittämisen tulokset

Naftaleenin hajukynnysarvo seitsemän panelistin perusteella oli keskiarvona **3,2 µg/m³** ($\pm 1,0$ µg/m³). Tämä on noin 50 % pienempi kuin kirjallisuudesta löydetty pienin hajukynnysarvo naftaleenille (7 µg/m³). Vaikka tutkimuksen määrittämismenetelmälle ei pystytty johtamaan kokonaisepävarmuusarviota, on todennäköistä, että 50 % epävarmuus on myös vähittäisin epävarmuusarvio-oletus, joka on suositeltavaa huomioida tulosta tulkittaessa.

3.5 Laskennallisten tarkastelujen tulokset

3.5.1 Ehjän rakenteen laskennallinen pintatuotto ja suojaavan rakenteen $D_{Naftaleeni}$

Naftaleenin laskennallinen SER-pintatuotto (sisäilmapitoisuudesta takaisinlaskettu pintaemissio) ja PAH-yhdistepitoista materiaalia ja sisäilmaa rajaavan materiaalin laskennalliset diffusiviteetit naftaleenille on esitetty taulukossa 16. Tulokset on esitetty taulukossa vertailun kammio mittauksella saatujen SER-tulosten kanssa.

Taulukko 16. Kammio mittauksella todetut materiaalipintojen naftaleenipäästöt, sekä sisäilman pitoisuuden ja bulk-pitoisuuden perusteella laskettu suojaavan rakenteen laskennallinen diffusiviteetti naftaleenille.

Tila, materiaali	SER _{kammio} [µg/m ² *h] ¹⁾	SER _{laskennallinen} [µg/m ² *h] ²⁾	Suojaava kerros materiaali, paksuus [m]	$D_{Naftaleeni}$ [m ² /s]	
1.1, Mat-1 pikisively	530	0.3	Betoni/hiekka/siporex/hiekka	0.05	4.78E-09
3.1.1 Mat-2 valuasfaltti	33	1.8	Kalkkirappaus	0.0075	2.22E-08
4.2.1, Mat-5, bitumiliima	0.13	1.0*	Sauvaparketti	0.008	Ei laskettu*
3.2.1 Mat-3, tervapaperi	0.039	23.6*	Rappaus/ kuonabetoni	0.0725	Ei laskettu*
4.1.1 Mat-4, korkkilevy	19	2.5**	Rappaus	0.006	1.52E-07
5.1, Mat-6, tervapahvi	0.093	0.02	Tapetti, pahvi, hirsi, tiivistetty pellavarive	0.12	4.93E-06

¹⁾ Koekappaleista kammiossa mitattu pintaemissio, PAH-yhdistepitoinen materiaali esillä, pintarakenteet (suojaava kerros) poistettu. ²⁾ Kohdetilan sisäilman naftaleenipitoisuuden c_e perusteella laskettu pintaemissio, pintarakenteet (suojaava kerros) lähtökohtaisesti ehjät.

*Bitumiliimanäytteen (materiaali 5, tila 4.1.1) ja tervapaperinäytteen (materiaali 3, tila 3.2.1) tapauksissa $SER_{laskennallinen}$ on suurempi kuin SER_{kammio} , mikä viittaa muuhun naftaleenilähteeseen tilassa tutkitun materiaalin lisäksi. Materiaalin 5 tapauksessa tilassa havaittiin bitumimateriaalin hajusta poikkeavaa, savumaista hajua, jonka lähteeksi arvioitiin vanhat savuhormit. Materiaali 3:n tapauksessa kohteen sisäilmasta mitattuun tulokseen vaikutti niin ikään merkittävästi tilaan muualta rakennuksesta kulkeutuneet PAH-yhdisteet (tila 3.2.1 on sisäilma yhteydessä porraskäytävän kautta mm. kellariin, jossa on PAH-yhdistepitoisia materiaaleja). Sisäilman ja materiaaliemissioiden yhdistekirjojen vertailun (kappale 3.2.1) perusteella tilan 3.2.1 materiaalilla 3 ei ollut merkittävää vaikutusta tilan sisäilman PAH-yhdistepitoisuuteen. Ylimääräinen päästölähde aiheuttaa erityisesti materiaalin 3 tapauksessa merkittävän virheen laskennallisen diffusiviteetin arvoon.

**Korkkieristenäytteen (materiaali 4, tila 4.1.1) tapauksessa PAH-yhdistepitoinen materiaali oli osin avoimena tilaan, mikä todennäköisesti vääristää tapauksen $D_{naftaleeni}$ tulosta, vaikka osin avoin pinta-ala on pyritty huomioimaan laskennassa.

Tervapahvin (materiaali 6, tila 5.1) tapauksessa suuri diffusiviteetin arvo johtuu varsinaisen diffuusioavoimuuden lisäksi todennäköisesti rakenteen heikosta ilmatiiveydestä

3.5.2 Naftaleenin kriittisen materiaalipitoisuuden määrittäminen hajukynnyksen perusteella

Taulukossa 17 on esitetty teoreettiset kriittiset arvot naftaleenin pintatuotolle ehjän rakenteen pinnalta sekä materiaalipitoisuus, joilla naftaleenin sisäilmapitoisuus ylittäisi tässä tutkimuksessa määritetyn hajukynnyksen $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tarkastelluissa tapauksissa ("kriittinen materiaalipitoisuus").

Taulukko 17. Teoreettiset kriittiset arvot naftaleenin pintatuotolle ehjän rakenteen pinnalta sekä materiaalipitoisuus, joilla naftaleenin sisäilmapitoisuus ylittäisi tässä tutkimuksessa määritetyn hajukynnyksen.

Tila, materiaali	A _{lähde} /V _{tila} [m ² /m ³]	Mittaukset/ mittaustuloksiin perustuvat		Laskennalliset hajukynnykseen perustuvat	
		SER _{laskennallinen} [μg/m ² h]	Materiaalipitoisuus [mg/kg]	SER _{kriittinen} [μg/m ² h]	Kriittinen materiaalipitoisuus [mg/kg]
1.1, Mat-1 pikisively	0.37	0.29	2640...3960	4.4	33028...74313
3.1.1 Mat-2 valuasfaltti	0.14	1.78	1760...2640	11.6	9551...21490
4.2.1, Mat-5, bitumiliima	0.32	-	0.8...1.2	5.0	-
3.2.1 Mat-3, tervapaperi	0.07	-	8...12	7.0	-
4.1.1 Mat-4, korkkilevy	0.50	2.5	50...76	7.3	122...274
5.1, Mat-6, tervapahvi	0.68	0.02	18...28	2.4	1568...3528

Taulukossa 17 ei ole esitetty kriittisiä arvoja materiaaleille 3 ja 5, koska laskenta perustuu sisäilmapitoisuuden kautta laskettuun SER_{laskennallinen}-arvoon, joka kyseisissä tapauksissa ei ollut luotettava johtuen tilan muusta naftaleenilähteestä tutkitun materiaalin lisäksi.

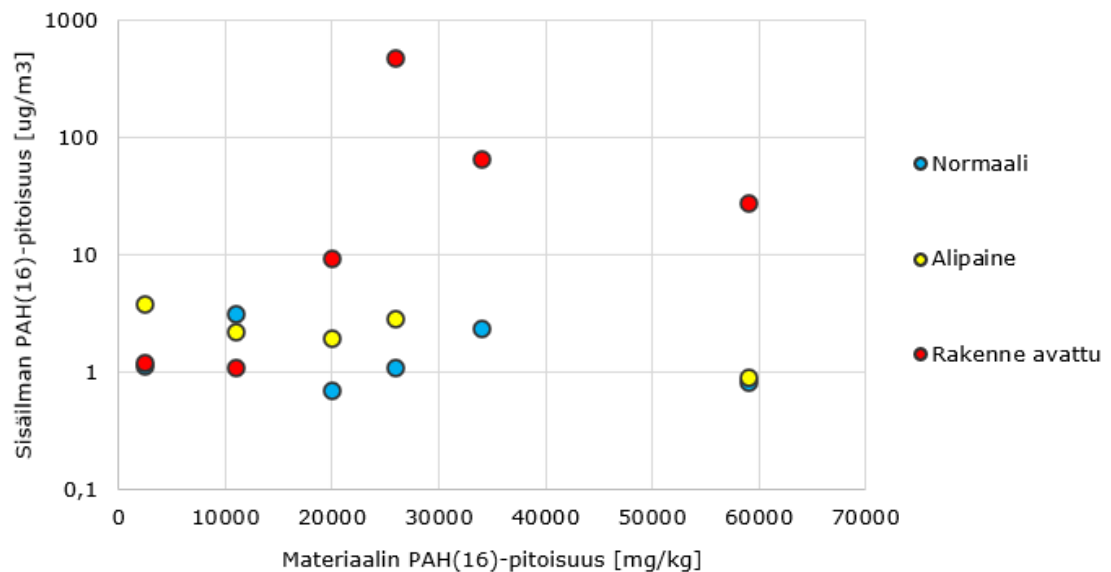
Laskennallinen materiaalin kriittinen naftaleenipitoisuus, joka aiheuttaisi hajukynnyksen ylittävän päästön tarkastelluin reunaehdoin, vaihteli tapauksesta riippuen erittäin voimakkaasti, välillä ~200–50 000 mg/kg.

Materiaaleista mitatut naftaleenipitoisuudet alittivat kriittiset materiaalipitoisuudet. Tulokset ovat linjassa sen kanssa, että tiloista ei normaaliolosuhteissa pääosin aistittu PAH-yhdisteiden hajuja. Tarkempi eri olosuhteissa mitattujen sisäilman naftaleenipitoisuuksien ja tiloista tehtyjen hajuhavaintojen vertailu kuitenkin osoitti, että naftaleenipitoisuus ei yksin selittänyt tiloissa tehtyjä hajuhavaintoja (ks. kohta 4.2 *Sisäilmasta mitattujen PAH-yhdisteiden yhteys sisäilman aistinvaraisesti arvioituun laatuun*). Tulosten perusteella hajuhavaintojen lähteenä ovat merkittävässä määrin muut yhdisteet kuin naftaleeni, mistä syystä kriittisen materiaalipitoisuuden määrittäminen naftaleenin hajukynnyksen perusteella ei voida pitää tarkoituksenmukaisena.

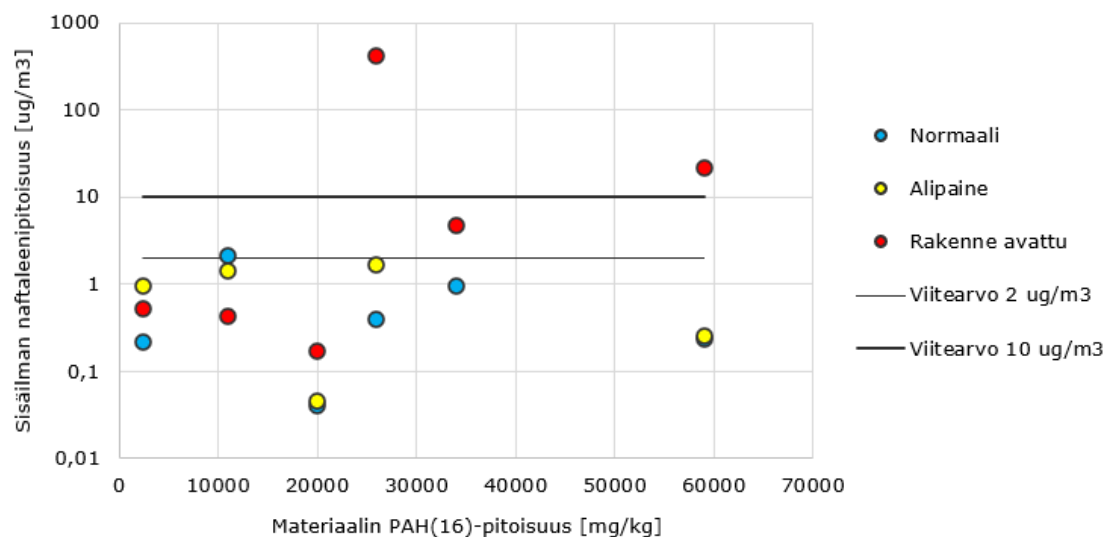
4 Tulosten tarkastelu

4.1 Materiaalien PAH-yhdistepitoisuuden vaikutus sisäilman PAH-yhdisteisiin ja sisäilman aistinvaraisesti arvioituun laatuun

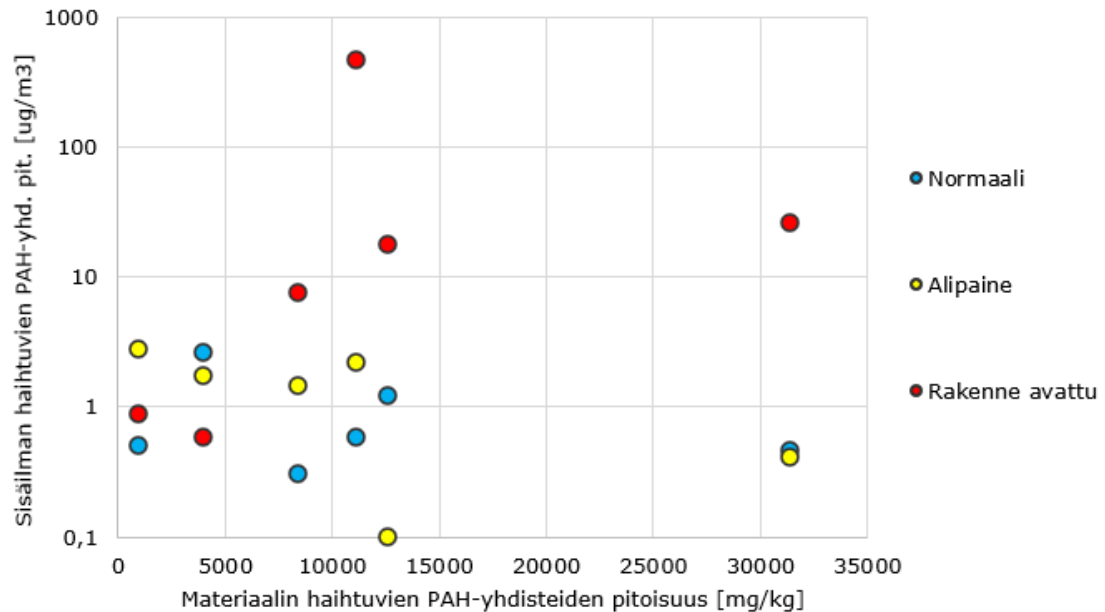
Sisäilmasta mitattuja PAH-yhdistepitoisuuksia tarkasteltiin suhteessa materiaalinäytteiden PAH-yhdistepitoisuuksiin. Tulokset on esitetty alla kuvissa 55 (PAH(16)-kokonaispitoisuus), 56 (naftaleenin pitoisuus) ja 57 (haihtuvien PAH-yhdisteiden [naftaleeni-pyreeni] kokonaispitoisuus) osalta. Lisäksi tarkasteltiin sisäilmassa aistitun PAH-yhdisteiden hajun yhteyttä materiaalien PAH-yhdistepitoisuuksiin (kuva 58).



Kuva 55. Materiaalinäytteiden PAH-yhdistepitoisuuksien ja tutkittujen tilojen sisäilmasta mitattujen PAH(16)-summapitoisuuksien vertailu. Huomaa y-akselin logaritminen asteikko.



Kuva 56. Materiaalinäytteiden PAH(16)-summapitoisuuksien ja tutkittujen tilojen sisäilmasta mitattujen naftaleenipitoisuuksien vertailu. Huomaa y-akselin logaritminen asteikko. Kuvaajaan on merkitty naftaleenin viitearvojen 2 ja 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tasot (viitearvot, ks. kohta 1.2.4).



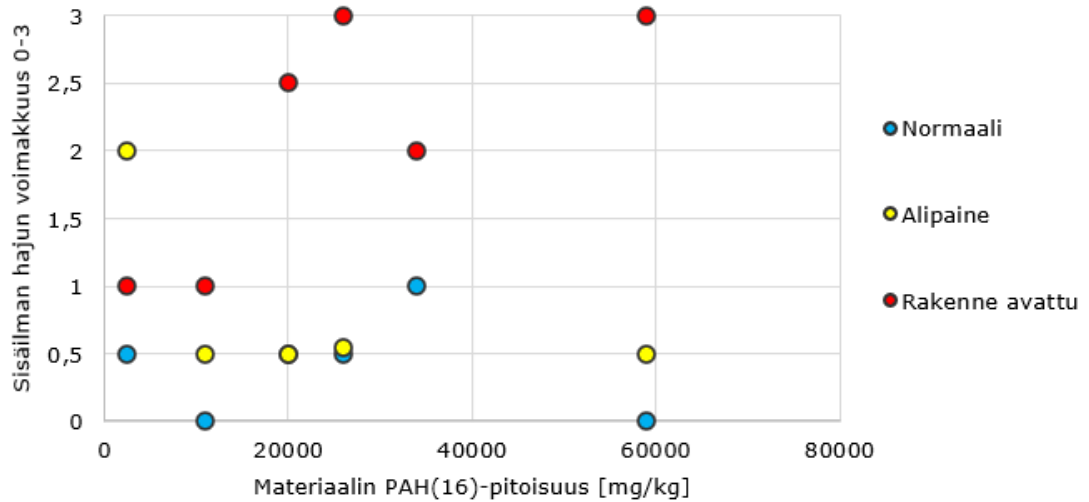
Kuva 57. Materiaalinäytteiden haihtuvien PAH-yhdisteiden summapitoisuuksien ja sisäilman haihtuvien PAH-yhdisteiden pitoisuuksien vertailu. Huomaa y-akselin logaritminen asteikko.

Tilojen normaalissa käyttöolosuhteessa ja alipainetilanteessa ei todettu yhteyttä materiaalin PAH(16)-summapitoisuuden ja sisäilmasta mitatun PAH(16)-summapitoisuuden tai naftaleenipitoisuuden välillä. Pitoisuudet sisäilmassa olivat kaikissa tiloissa matalia, PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuus oli alle $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja naftaleenin pitoisuus $\leq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Myöskään materiaalissa olevien haihtuvien PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuuden ja sisäilmasta mitattujen haihtuvien PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuuden välillä ei todettu yhteyttä.

Rakenneavaustilanteessa materiaalipitoisuuden ja sisäilmapitoisuuden välillä todettiin yhteys. PAH(16)-kokonaispitoisuus sisäilmassa nousi rakenneavauksen aikana selvästi kolmessa tilassa, tasolle $27\text{--}470 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Näissä tiloissa materiaalin PAH(16)-pitoisuus oli $> 25\,000 \text{ mg}/\text{kg}$. Kaikki rakenneavauksen aikaiset näytteet otettiin tilanteessa, jossa PAH-yhdistepitoisen materiaalin irrotustyö oli käynnissä.

Normaali- ja alipainetilanteessa sisäilmassa todettiin yksinomaan kaasufaasin yhdisteitä (ks. kohta 3.2.1 *Tutkittujen tilojen sisäilmapitoisuudet eri olosuhteissa*). Rakenneavausten aikana kahdessa tilassa (valuusfaltin tutkimustila 3.1.1 ja korkkilevyn tutkimustila 4.1.1) todettiin sisäilmamittauksessa myös hiukkasfaasin yhdisteitä. Bentso[a]pyreenin sisäilmapitoisuudet olivat näissä tiloissa rakenneavaustilanteessa $0,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tila 3.1.1) ja $4,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tila 4.1.1). Jälkimmäinen arvo on melkein puolet bentso[a]pyreenin 8h HTP-arvosta ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), joten on todennäköistä, että joissakin tilanteissa HTP-arvo voi ylittyä. Rakenneavaustyöntekijöiden potentiaalinen altistuminen on siis huomioitava. Kuitenkin, kuten aiemmin mainittu, kyseinen HTP-arvo ei ole ajantasalla, eikä sen siksi katsota soveltuvan työperäisen PAH-altistumisen terveystarvintoihin (vrt. kohdat 1.2.5 *Sisäilmapitoisuuksien ohje-, raja- ja viitearvot* ja 1.3 *PAH-yhdisteiden haitalliset ominaisuudet sekä 1.5.3 PAH-yhdistepitoisen materiaalin purku*).

Tilojen sisäilmasta aistitun PAH-yhdisteiden hajun yhteyttä materiaalin PAH(16)-yhdistepitoisuuteen on tarkasteltu kuvassa 58.



Kuva 58. Materiaalinäytteiden PAH(16)-yhdisteiden pitoisuuksien ja sisäilmassa aistitun hajun vertailu.

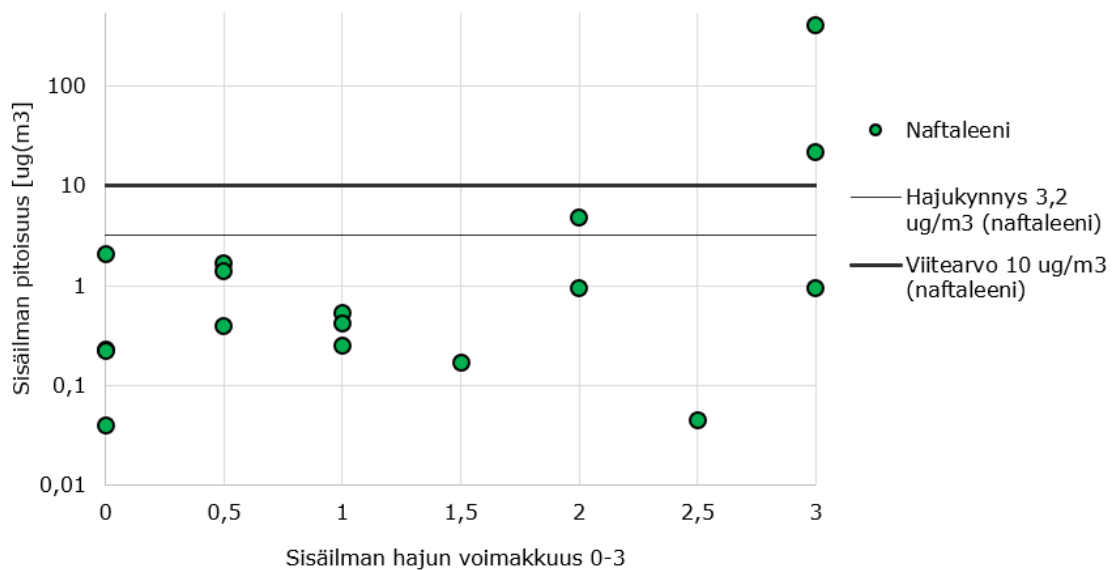
Tutkimusaineistossa materiaalin ja sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksilla ei ollut korrelaatiota tilojen normaalissa käyttötilanteessa. Myöskään materiaalin PAH-yhdistepitoisuuden ja tilassa aistitun PAH-yhdisteiden hajun välillä ei todettu yhteyttä. Rakenneavaustilanteessa sisäilman PAH-yhdistepitoisuus nousi ja tilassa aistitut hajut olivat voimakkaampia, mikäli rikkotu materiaali sisälsi runsaasti PAH-yhdisteitä. Rakenneavaustilanteissa sisäilmasta mitattiin osin hyvin korkeita pitoisuuksia sekä kaasumaisia että hiukkasmaisia PAH-yhdisteitä.

4.2 Sisäilmasta mitattujen PAH-yhdisteiden yhteys sisäilman aistinvaraisesti arvioituun laatuun

Sisäilman PAH-yhdisteiden pääkomponenttina oli tutkituissa kohteissa yleisimmin naftaleeni. Metyyli-naftaleeneja ja fenantreenia esiintyi myös yleisesti. Yhdessä kohteessa (kohde 5, materiaali 6, ulkoseinän tervapahvi) sisäilman naftaleenipitoisuudet olivat matalia, ja materiaali-peräisten PAH-yhdistepäästöjen pääkomponentti oli fenantreeni.

Sisäilmanlaadusta tehtyjä aistinvaraisia arviointeja verrattiin sisäilmasta mitattuihin PAH-yhdistepitoisuuksiin ja yhdistekirjoon (kuvat 59 - 61). Tarkasteluissa oli mukana niin normaalitilanteen kuin alipaine- ja rakenneavaustilanteidenkin mittaustulokset.

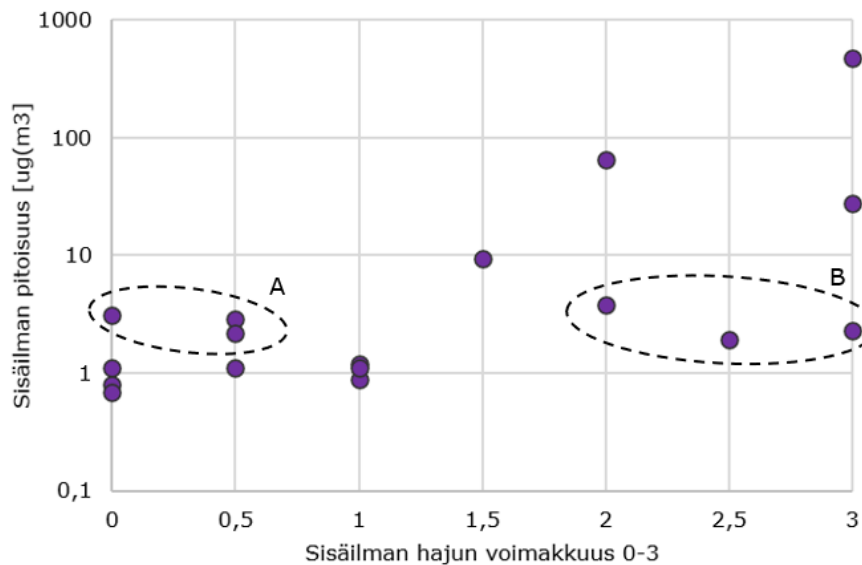
Sisäilman naftaleeni korreloi heikosti sisäilmassa aistittujen hajujen kanssa (kuva 59). Naftaleenipitoisuus ei aina ylittänyt hajukynnystä $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tiloissa, joissa havaittiin PAH-yhdisteiden hajua. Naftaleenin hajukynnystarkastelun perusteella todettiin, että tilassa voi olla selvästi aistittavaa PAH-yhdisteiden hajua, vaikka naftaleenin mitattu pitoisuus alittaisi hajukynnyn. Tällöin hajuaistimuksen aiheuttajana ovat muut PAH-yhdisteet tai eri PAH-yhdisteiden yhteisvaikutus.



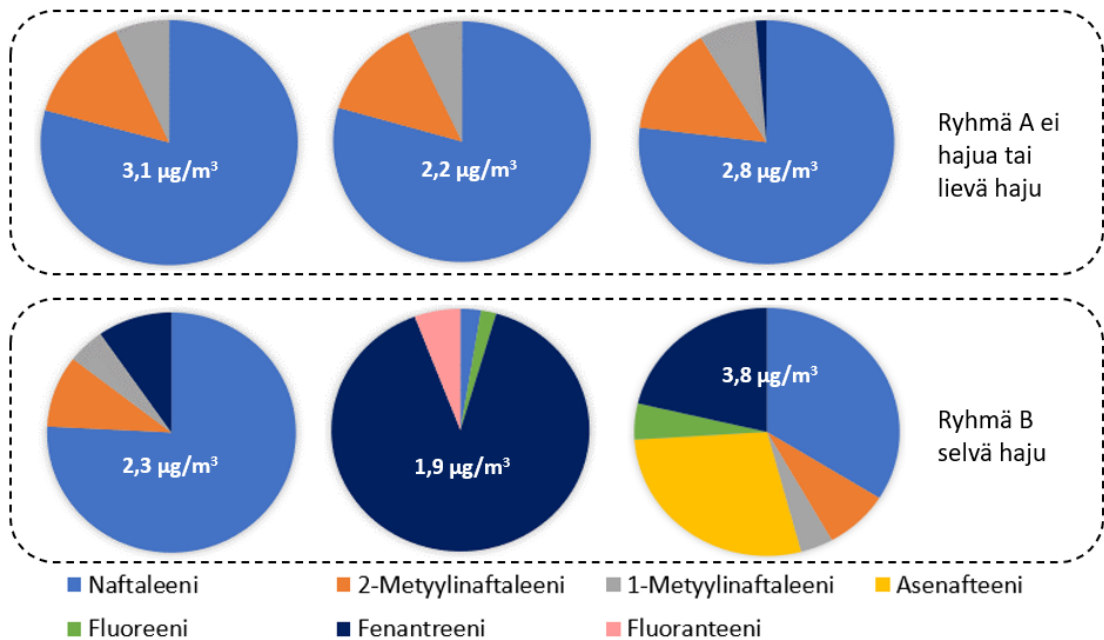
Kuva 59. Sisäilmassa aistitun PAH-yhdisteiden hajun ja sisäilmasta mitattujen naftaleenipitoisuuksien vertailu. Hajuhavaintojen luokittelu: 0=ei hajua, 1=ajoittainen lievä tai jatkuva hyvin lievä haju, 2=ajoittainen selvä tai jatkuva lievä haju, 3=jatkuva selvä haju. Kuvaajaan on merkitty myös tässä tutkimuksessa määritetty naftaleenin hajukynnys $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja asumisterveysasetuksen STMa 545/2015 mukainen naftaleenin toimenpideraja-arvo $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sisäilmamittausten tulosten ja sisäilmasta aistitun PAH-yhdisteiden hajun välillä voitiin havaita naftaleenia hieman parempi korrelaatio PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuuden osalta (kuva 60). Karkeasti ottaen PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuden ylittäessä $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PAH-yhdisteiden haju oli selvästi aistittavissa.

PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuden ollessa $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sisäilmassa aistittujen hajujen voimakkuus vaihteli voimakkaasti. Ilmiön syyn selvittämiseksi vertailtiin sisäilman PAH-yhdistekirjoa tiloissa, joissa summapitoisuus oli $2-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja PAH-yhdisteiden hajua ei aistittu (ryhmä A) tiloihin, joissa pitoisuus oli samalla tasolla, mutta haju aistittiin selvänä tai voimakkaana (ryhmä B). Ko. sisäilmanäytteet on merkitty kuvaan 60. Yhdistekirjon vertailun tulokset on esitetty ryhmittäin kuvassa 61.



Kuva 60. Sisäilmassa aistitun PAH-yhdisteiden hajun ja sisäilmasta mitattujen kokonaispitoisuuksien vertailu (PAH(16)+metyyli-naftaleenit). Hajuhavaintojen luokittelu: 0=ei hajua, 1=ajoittainen lievä tai jatkuva hyvin lievä hajua, 2=ajoittainen selvä tai jatkuva lievä hajua, 3=jatkuva selvä hajua. Kuvaajaan on rajattu näytteet, joissa PAH(16)-yhdisteiden yhteispitoisuus oli 2–10 µg/m³ ja PAH-yhdisteiden hajua ei aistittu / se oli lievää (ryhmä A) ja hajua oli selvää tai voimakasta (ryhmä B).



Kuva 61. Sisäilmassa aistitun PAH-yhdisteiden hajun voimakkuuden yhteys sisäilmasta mitattuun yhdistekirjoon. Ryhmät A ja B, ks. edellinen kuvaaja. Kussakin sektorikuvaajassa on esitetty yhden sisäilmanäytteen PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus (PAH(16)+metyyli-naftaleenit) ja yhdistekirjo.

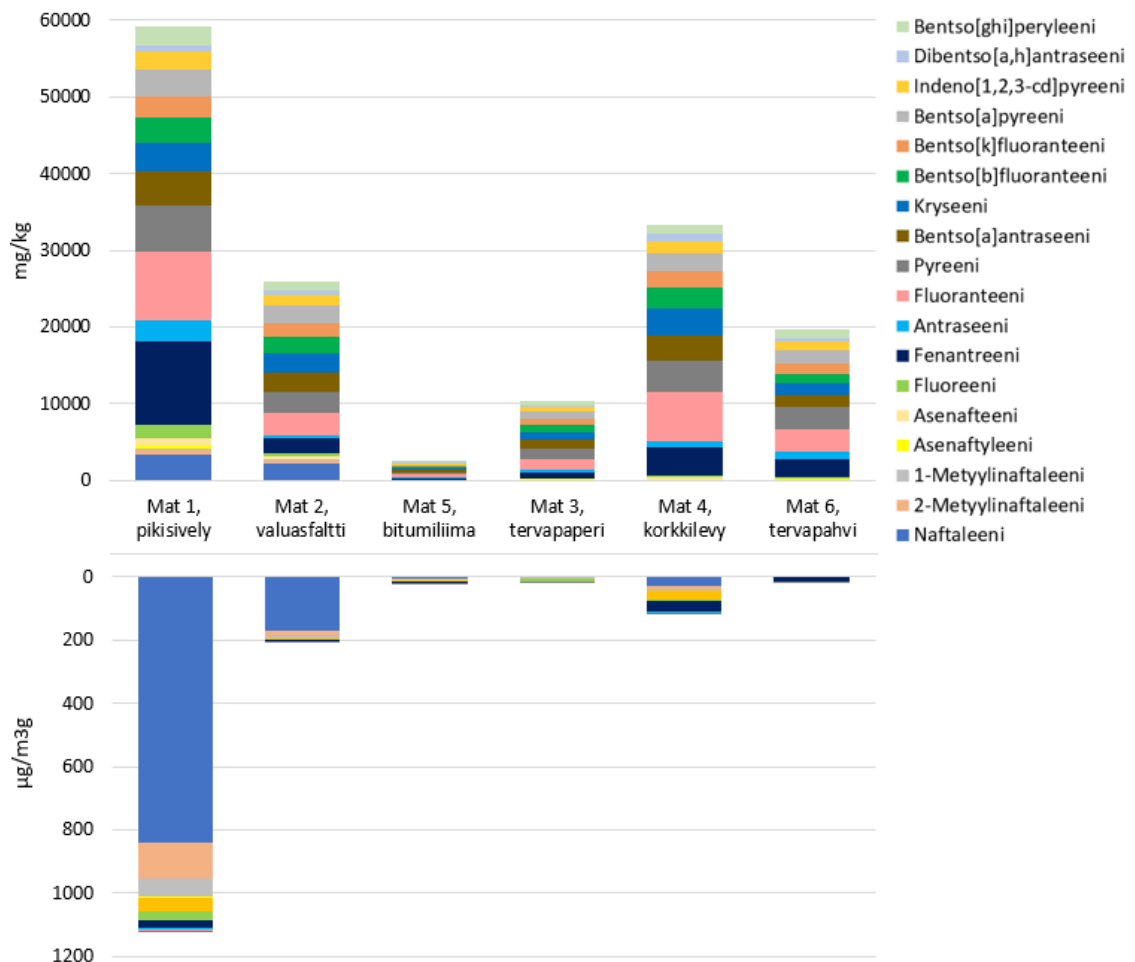
Tarkastellussa aineistossa sisäilman PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuksiin nähden voimakas PAH-yhdisteiden hajua sisäilmassa vaikutti liittyvän naftaleeneja raskaampien PAH-yhdisteiden kuten asenaftaleenin, fluoreenin, fenantreenin ja/tai fluoranteenin esiintymiseen. Sen sijaan tiloissa, joiden sisäilmassa todettiin vain naftaleeneja, hajua oli suhteessa lievempi. Todellisissa tiloissa tehtyjä aistinvaraisia havaintoja arvioitaessa tulee kuitenkin huomioida,

että hajaistimuksiin ovat voineet vaikuttaa myös muut yhdisteet kuin mittauksilla todetut PAH-yhdisteet.

4.3 Materiaalien PAH-yhdistepitoisuuden ja bulk-emissioiden vertailu

Bulk-mikrokammioemissionäytteissä todettiin pyreeniä ja sitä kevyempiä PAH-yhdisteitä, kuten yhdisteiden haihtuvuuden perusteella voitiin odottaa (vrt. raportin kohta 1.2). Bentso[a]antraseenin ja sitä raskaampia kaasu- ja hiukkasfaasin yhdisteiden pitoisuudet olivat alle määrittäysrajan emissiokammioista kerätyissä näytteissä.

Materiaalien emissiopotentiaalia (bulk-mikrokammioemissionälyysin tulokset) tarkasteltiin suhteessa materiaalinäytteiden PAH-yhdistepitoisuuksiin. Vertailussa on mukana PAH(16)-yhdisteet ja metyyliinaftaleenit. Tulokset on esitetty näytteittäin alla olevassa kuvaajassa (kuva 62).



Kuva 62. Materiaalinäytteiden PAH-yhdistepitoisuuksien (kuvaajan yläosa) ja näytteiden emissiopotentiaalin (bulk-emissio, kuvaajan alaosa) vertailu. Yläkuvassa haihtuvimmat yhdisteet ovat kuvaajan alaosassa, alakuvassa haihtuvimmat yhdisteet ovat ylhäällä, ts. kuvaajat ovat yhdisteiden järjestyksen suhtensa peilikuvia.

Bulk-emissionäytteiden tuloksista nähdään, että näytteiden emissiopotentiaali oli riippuvainen materiaalin PAH-yhdistepitoisuudesta ja erityisesti herkästi haihtuvien yhdisteiden pitoisuudesta. Pääosa mikrokammioilla todetuista emissioista koostui haihtuvimmista yhdisteistä, so. naftaleeneista, asenaftyleenista ja asenaftenista. Bulk-emissionäytteissä ei todettu lainkaan hiukkasfaasin yhdisteitä.

4.4 Laskennallisten tarkastelujen perusteella tehtävä analyysi

Vaikka laskennallisen tarkastelun yksittäisiä numeroarvoja on syytä pitää viitteellisinä, voitiin tarkastelusta katsoa olevan merkittävää lisäarvoja mittaustulosten analyysin kannalta. Sovelletujen tarkasteluiden avulla voitiin arvioida, onko tutkittu materiaali todennäköinen sisäilmariskin aiheuttaja.

1. Sisäilmapitoisuuden perusteella lasketun $SE_{laskennallinen}$ ja mitatun SE_{kammio} -arvojen perusteella, kohteessa 3 voitiin todeta, että $SE_{laskennallinen}$ on suurempi kuin SE_{kammio} , mikä viittaa muuhun naftaleenilähteeseen kuin tutkittuun materiaaliin.
2. Vaikka PAH-yhdistepitoista ainetta suojaavan rakennekerroksen diffusiviteettiä ei pystytä tulosten perusteella määrittämään, voidaan viitteellisen laskennan perusteella tutkia suuruusluokkaa ja sen perusteella tarkasteltavan materiaalin aiheuttamaa riskiä. Tavanomaisesti PAH-pitoinen aine on rakenteessa ns. suojaavan rakennekerroksen alla. Jotta suojaavan kerroksen vaikutus PAH-massavirtaan pystyttäisiin arvioimaan, olisi tiedettävät kyseisen materiaalin läpäisykerroin PAH-yhdisteille (D_{PAH}), eikä tällaisia määrityksiä käytännössä ole julkaistu. Viitteellisiä arvoja suuruusluokasta naftaleenille on kuitenkin olemassa aiempien tutkimusten perusteella (Sievola, 2010), joiden mukaan diffusiviteetti naftaleenille ($D_{naftaleeni}$) on luokkaa $\sim 1e-8 \dots 1e-7 \text{ m}^2/\text{s}$ laasti/kuitusementtilevytuotteilla. Tulokset olivat jopa yllättäen suuruusluokaltaan oikean suuntaisia; betoni selkeästi tiiviimpää (pienempi diffusiviteetti) ja laastituotteet samaa tasoa. Hirsiseinän osalta laskennallinen diffusiviteetti oli kuitenkin suurempi mikä viittaa joko muuhun lähteeseen tai naftaleenin siirtymiseen muulla tavoin (ilmavuoto).

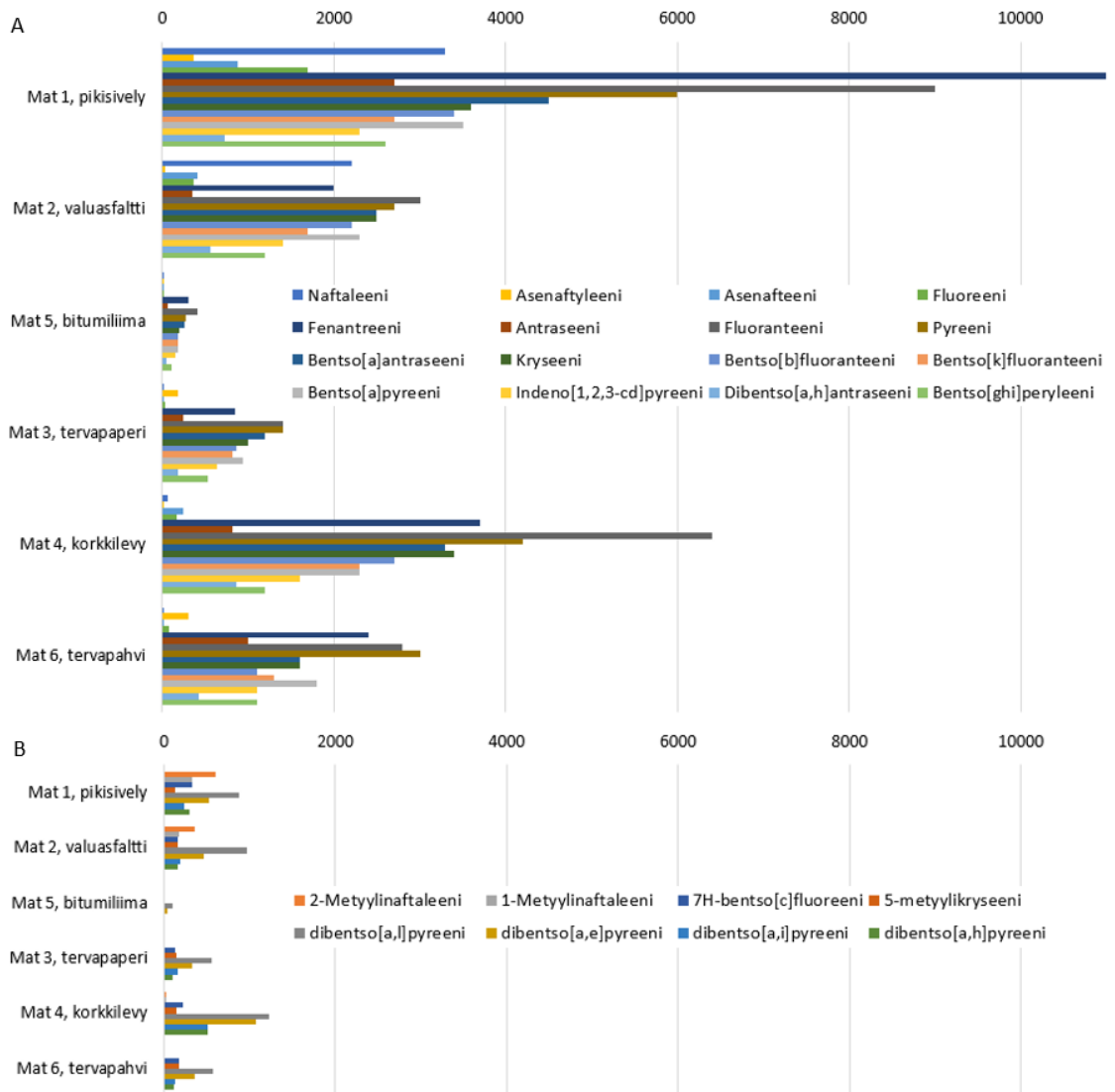
Sen sijaan teoreettisten kriittisen tuottotekijän ja pitoisuuden määrittäminen perusteella ei antanut mittaustulosten analysointiin lisäarvoa. Tulosten perusteella materiaalipitoisuudet eivät selittäneet tilojen hajuhavaintoja. Karkeasti arvioiden voidaan kuitenkin todeta, että massamaisille materiaaleille saadut viitteelliset kriittiset materiaalipitoisuudet olivat suurempia kuin huokoisille materiaaleille.

Eri mittausmenetelmien soveltaminen laskennallisen tarkastelun lähtötietoina todettiin haastavaksi, koska mittausmenetelmiin liittyvien epävarmuustekijöiden lisäksi laskennalliseen tarkasteluun tarvittavia materiaalitietoja ei ole saatavilla. Kaiken kaikkiaan mittausmenetelmien ja laskennallisen tarkastelun kehittämiseen vaadittavan materiaalien laboratoriotestaukseen liittyy periaatteellinen ongelma siitä, että PAH-yhdistelähteen (rakenteessa olevan materiaalin) ominaisuudet muuttuvat aina rakenteesta irrotettuna – rakennetta rikottaessa materiaalin kyky emittoida PAH-yhdisteitä muuttuu.

4.5 PAH(16)-listan ulkopuolisten PAH-yhdisteiden esiintyminen

Rakennusmateriaaleista analysoitiin tutkimuksessa PAH(16)-listan yhdisteiden lisäksi myös kahdeksan listan ulkopuolisen PAH-yhdisteen pitoisuudet. Tulokset on esitetty alla kuvissa 63A ja 63B näytteittäin rinnakkain PAH(16)-listan yhdisteiden kanssa.

PAH(16)-listan ulkopuolisten yhdisteiden pitoisuudet olivat pääosin matalia PAH(16)-yhdisteiden pitoisuuksiin verrattuna. Eniten todettiin dibentso[a,l]pyreeniä ja dibentso[a,e]pyreeniä ja näiden pitoisuudet korreloivat PAH(16)-summapitoisuuden kanssa.



Kuva 63. A) PAH(16)-yhdisteiden ja B) PAH(16)-yhdistelistan ulkopuolisten yhdisteiden esiintyminen materiaalinäytteissä (materiaali 1-6).

Analyytitulosten perusteella 1-metyyli-naftaleenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 8,5-320 mg/kg, 2-metyyli-naftaleenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 7,9-600 mg/kg, 7H-bentso[c]fluoreenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 131-325 mg/kg, 5-metyylikryseenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 135-180 mg/kg, dibentso[a,l]pyreenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 92-1 232 mg/kg, dibentso[a,e]pyreenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 39-1 075 mg/kg, dibentso[a,i]pyreenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 14-540 mg/kg ja dibentso[a,h]pyreenin pitoisuudet vaihtelivat välillä 10-505 mg/kg. Pitoisuuksia voidaan pitää merkittävinä erityisesti näitä sisältävien jätteiden käsittelyn ja purkujätteen loppusijoituksen kannalta, koska monilla näistä on ympäristölle haitallisia ominaisuuksia ja/tai niiden voidaan katsoa olevan syöpävaarallisia. Vastaavasti useille näistä yhdisteistä on asetettu vaaralausekkeita, jotka vaikuttavat suuresti niitä sisältävän purkujätteen loppusijoitukseen. Täten ne olisi suositeltavaa ottaa huomioon haitta-ainetutkimuksissa.

Taulukossa 18 on esitetty tässä tutkimuksessa PAH(16)-listan ulkopuolelta analysoitujen PAH-yhdisteiden ominaisuuksia. Analysoiduista yhdisteistä metyyli-naftaleeneilla sekä mahdollisesti 7H-bentso[c]fluoreenilla on fysikaalisten ominaisuuksiensa perusteella mahdollisuus vaikuttaa sisäilman laatuun.

Taulukko 18. Tässä tutkimuksessa mukana olleet PAH(16)-listan ulkopuolisten PAH-yhdisteet ja niiden ominaisuuksia

Yhdiste	Molekyylikaava	Moolimassa (g/mol)	Sulamispiste (°C)	Kiehumispiste (°C)
1-metyyli-naftaleeni	C ₁₁ H ₁₀	142	-22	245
2-metyyli-naftaleeni	C ₁₁ H ₁₀	142	35	241
7H-bentso[c]fluoreeni	C ₁₇ H ₁₂	216	125	398
5-metyyliryseeni	C ₁₉ H ₁₄	242	117	449
dibentso[a,l]pyreeni	C ₂₄ H ₁₄	302	164	631
dibentso[a,e]pyreeni	C ₂₄ H ₁₄	302	234	552
dibentso[a,i]pyreeni	C ₂₄ H ₁₄	302	284	552
dibentso[a,h]pyreeni	C ₂₄ H ₁₄	302	318	596

Metyyli-naftaleenien haihtuvuus ja läsnäolo tutkimuskohteiden ilmassa todettiin tämän tutkimuksen sisäilmamittauksissa (ks. kappale 3.2 *Kohdetilojen PAH-yhdisteiden sisäilmapitoisuudet*). Muita PAH(16)-listan ulkopuolisia yhdisteitä ei tässä tutkimuksessa mitattu sisäilmasta. 7H-bentso[c]fluoreenin aiheuttamaa sisäilmariskiä tarkasteltiin kuitenkin vertaamalla sitä ominaisuuksiltaan lähimpiin PAH(16)-listan yhdisteisiin. 7H-bentso[c]fluoreenin haihtuvuus on kirjallisuuden perusteella lähellä pyreeniä ja kryseeniä. Pyreeni on normaaleissa sisäilmaolosuhteissa marginaalisesti haihtuva ja kryseeni käytännössä haihtumaton yhdiste. Tämän hankkeen rakennusmateriaaleissa pyreeniä ja kryseeniä todettiin runsaasti. Sisäilmassa näistä todettiin vain pyreeniä, ja tätäkin vain yhdessä tutkimuskohteessa pieninä pitoisuuksina ($\leq 0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) hellesäällä tehdyissä mittauksissa. 7H-bentso[c]fluoreenin pitoisuudet rakennusmateriaaleissa olivat pyreeniin ja kryseeniin verrattuna pieniä. Edellä esitetyn perusteella on todennäköistä, että mikäli 7H-bentso[c]fluoreeni ylipäättään on haihtuva, sen pitoisuudet sisäilmassa ovat hyvin matalia.

4.6 Sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin vaikuttavat olosuhde- ja rakennetekijät

Tutkimusaineiston perusteella materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet eivät selittäneet tilojen sisäilmasta mitattujen PAH-yhdistepitoisuuksien eroja. Aineiston pienuuden ja vaikuttavien tekijöiden määrän takia järjestelmällistä tarkastelua pitoisuuksiin ja hajuihin vaikuttaneista rakenne- ja olosuhdetekijöistä ei ollut mahdollista tehdä. Seuraavien tekijöiden arvioitiin kuitenkin vaikuttaneen vähintään tapauskohtaisesti merkittävällä tavalla sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin ja sisäilmassa aistittuun hajuun:

- PAH-yhdistepitoista materiaalia ja sisäilmaa rajoittavan rakenteen materiaali, laatu ja eheys. Paksu, ehjä ja ilmatiivis materiaali vähensi yhdisteiden päästöjä sisäilmaan.
- Itse PAH-yhdistepitoisen materiaalin pinnan eheys. Rikkoutumaton materiaalipinta vähensi yhdisteiden päästöjä sisäilmaan. Rakenteen avaaminen ja materiaalipinnan rikkoutuminen voimistivat päästöjä ja hajua, erityisesti kun kyseessä oli runsaasti haihtuvia PAH-yhdisteitä sisältävä materiaali.
- Materiaalin sisältämien haihtuvien PAH-yhdisteiden pitoisuus (erityisesti naftaleeni, metyyli-naftaleenit, asenaftyleeni ja asenafteeni). Pieni haihtuvien yhdisteiden määrä vähensi yhdisteiden päästöjä sisäilmaan.
- Sisäilman lämpötila; kohteen 5 vertailevien sisäilmamittausten perusteella lämpötilan nousu ~ 10 asteella voimisti materiaalipäästöjä selvästi ainakin huokoisesta, sisäilmayhteydessä olevasta materiaalista. Lämpötilan nousu vaikutti myös yhdistekirjoon kasvat- taen sitä. Vastaava lämpötila ei kuitenkaan aiheuttanut voimakkaita päästöjä PAH-

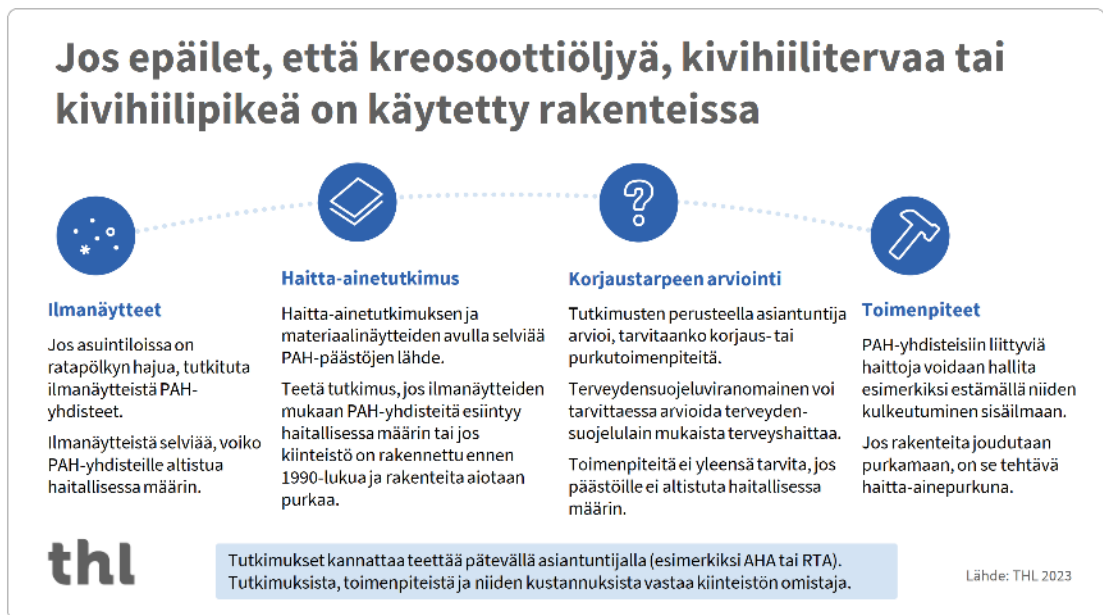
yhdistepitoisen materiaalin ollessa tiiviin betonirakenteen sisällä (kohde 1). Sisäilmaan emittoituvien haihtuvien yhdisteiden PAH-yhdistekirjo materiaalissa vaikutti hajuaistimuksen intensiteettiin ja laatuun.

- Tilan alipaineisuus. Alipaineisuuden vaikutus materiaalipäästöihin vaihteli paljon materiaalista, rakennetyypistä ja tilan rakenteiden yleisestä ilmatiiveydestä riippuen; mikäli tilassa oli merkittäviä ilmavuotoreittejä PAH-yhdistepitoista materiaalia sisältävästä rakenteesta, pitoisuudet nousivat alipainetilanteessa, mutta mikäli ilmavuotoreitit sijaitsivat muualla, pitoisuudet laskivat.
- Ilmanvaihdon toimivuus; tällä ei ollut aineistossa ilmeistä yhteyttä sisäilmapitoisuuksiin. Ilmanvaihtokerroin vaikuttaa kuitenkin sisäilmapitoisuuksiin lähtökohtaisesti lineaarisesti, mikäli ilmanvaihto huuhtelee tilaa asianmukaisesti.

4.7 Etenemismalli PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien aiheuttamien riskien ja toimenpidetarpeiden arvioimiseen

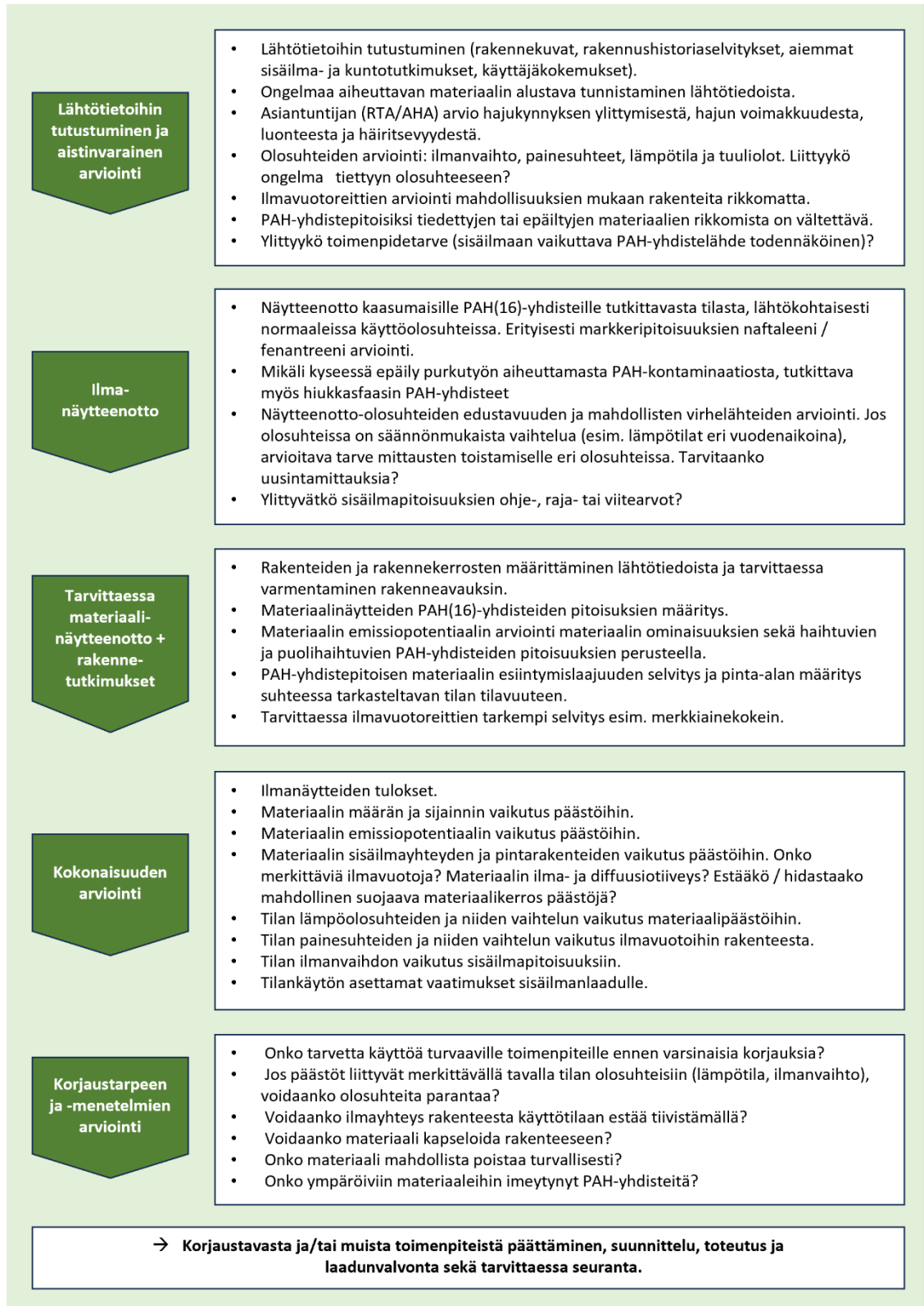
Tutkimuksen perusteella PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien PAH(16)-yhdisteiden summakonsentraatioiden perusteella ei voida arvioida suoraan materiaalista aiheutuvia sisäilmariskejä tavanomaisessa käyttötilanteessa.

Terveiden ja hyvinvoinnin laitos on vastikään ohjeistanut tutkimusmenettelyn tilanteessa, jossa rakenteissa epäillään olevan PAH-yhdistepitoisia materiaaleja (kuva 64).



Kuva 64. Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen ohjeen mukainen toimintamalli tilanteessa, jossa rakenteissa epäillään olevan PAH-yhdistepitoista materiaalia.

Tämän tutkimuksen perusteella päädyttiin tarkentamaan THL:n mallia. Tarkennettu menetelytapa PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien aiheuttamien riskien arvioimiseen on esitetty alla kuvassa 65.



Kuva 65. Etenemismalli PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien aiheuttamien riskien ja toimenpidetarpeiden arvioimiseen.

5 Johtopäätökset ja pohdinta

Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet ja pitoisuuksien yhteys sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin

Tutkimuksen aineisto oli pieni, mutta edusti melko kattavasti erityyppisiä, yleisesti käytettyjä PAH-yhdistepitoisia rakennustuotteita. Myös tutkittujen materiaalien PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuudet edustivat tyypillisiä kivihiilitervapohjaisia aineita sisältäviä materiaaleja. Tutkimuksessa oli mukana myös yksi tuote, joka oli pääosin bitumipohjainen.

Tutkimuksessa tarkasteltujen materiaalien PAH-yhdistekirjo oli samantyyppinen kuin aikaisemmassa suomalaisessa tutkimuksessa todettu (Komulainen ym. 2018). Tutkimusaineistossa massamaiset materiaalit sisälsivät paitsi huomattavia PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuksia, myös selvästi suurempia pitoisuuksia haihtuvia PAH-yhdisteitä kuin huokoiset materiaalit. Tästä huolimatta sisäilmamittausten perusteella PAH-yhdisteiden päästöt massamaisista materiaaleista olivat vähäisiä tilojen normaalissa käyttöolosuhteessa. Materiaalin rikkoutuminen taas aiheutti voimakkaat päästöt massamaisista materiaaleista. Syynä ilmiöön on massamaisten materiaalien pinnan muuttuminen ajan myötä itsessään diffuusiotiiviiksi ("lasittuminen" tai "nahoittuminen"). Ehjä, lasittunut pinta sulkee haihtuvat yhdisteet materiaalin sisään. Havainnot näiden näytteiden materiaalipitoisuuksista tukevat osaltaan aiemman tutkimuksen (Komulainen ym. 2018) johtopäätöstä siitä, ettei materiaalien PAH(16)-summapitoisuus yksinään sovellu sisäilmariskien arviointiin materiaalien ollessa koskemattomassa tilassa ehjinä rakenteiden sisällä.

Materiaalien PAH-yhdistepitoisuudella (PAH(16), naftaleeni tai haihtuvat PAH-yhdisteet) ei ollut suoraa yhteyttä kohteiden sisäilmasta mitattuihin pitoisuuksiin. Esimerkiksi tilassa, jossa materiaalin PAH(16)-summapitoisuus oli tutkimuksen suurin (59 000 mg/kg) sisäilma todettiin PAH(16)-yhdistepitoisuus oli erittäin matala, 0,32 µg/m³. Kyseisessä tapauksessa materiaalin ja sisäilman välissä on monikerroksinen, betonia ja kevytbetonia sisältävä lattian pintarakenne. Nämäkin tulokset tukevat johtopäätöstä, ettei materiaalien PAH(16)-summapitoisuus yksinään sovellu sisäilmariskien arviointiin.

Materiaalia rikotaessa tilaan vapautuvat emissiot, mitattu sisäilmapitoisuus ja hajuhavainnot korreloivat suhteellisen hyvin materiaalin PAH(16)-yhdisteiden summakonsentraation ja erityisesti haihtuvien PAH-yhdisteiden kanssa.

Pintarakenteiden vaikutus päästöihin

Tutkimuksen yhtenä alkuperäisenä tavoitteena oli arvioida materiaalien aiheuttamia sisäilmariskejä mittaamalla ehjien materiaalipintojen PAH-yhdisteiden pintatuottoja emissiokammiossa. Erityisesti massamaisten materiaalien irrottaminen täysin rikkoutumattomina emissiokammiokeita varten osoittautui kuitenkin käytännössä mahdottomaksi, eikä myöskään kohteella tehtävä pintaemissiomittaus FLEC-laitteella ollut tehtävissä pintojen epätasaisuuden vuoksi. Vaikka ehjien rakenteiden päästöjä ei saatu mitattua, kammiokeiden tulosten voidaan arvioida edustavan karkeasti ottaen tilannetta, jossa PAH-yhdistepitoinen materiaali on otettu esiin rakenteesta, jolloin sen pinta on jonkin verran rikkoutunut. Kammiokeissa todettujen mallihuonepitoisuuksien todettiin olevan pääosin huomattavasti tilasta mitattuja sisäilmapitoisuuksia suurempia, joten materiaalipinnan eheydellä ja sisäilman ja materiaalin välisillä materiaalikerroksilla voitiin todeta olleen merkittävä vaikutus materiaalien emissiotasoihin.

Pintarakenteiden diffuusiotiiveyttä selvitettiin laskennallisesti. Laskenta tehtiin käyttäen tarkasteltavana yhdisteenä naftaleenia, joka on PAH-yhdisteistä haihtuvin. Sisäilmapitoisuudesta takaisin lasketun SER-pintatuoton ja SER-kammiokeiden tuloksia vertaamalla sekä

laskennallisen pintarakenteiden diffusiviteetin perusteella pystyttiin selvittämään, ovatko tulokset loogisia osoittaen mahdollisen haitan aiheuttajan olevan tutkittu PAH-yhdistepitoinen materiaali, vai viittasiko tulos johonkin toiseen PAH-lähteeseen. Lisäksi laskennallisen naftaleenille määritetyn diffusiviteetin perusteella voitiin arvioida ensisijaista siirtymismuotoa diffuusio/konvektio. Sen sijaan hajukynnyksen perusteella määritetyt teoreettiset kriittinen tuottotekijä ja -pitoisuus eivät antaneet mittaustulosten analysointiin lisäarvoa. Verrattaessa hajuhavaintoihin materiaalipitoisuus ei selittänyt tilojen hajuhavaintoja.

Sisäilman PAH-yhdistepitoisuudet ja yhdistekirjo

Tutkimuksessa mitatut sisäilman PAH-yhdistepitoisuudet olivat tilojen normaaleissa käyttöolosuhteissa matalia. Sisäilman PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet vaihtelivat välillä 0,3–2,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja naftaleenipitoisuudet välillä 0,2–2,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pitoisuudet olivat matalia verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin tapauksiin, joissa kohdetiloissa on esiintynyt sisäilmaan liitettyä oireilua. Näissä naftaleenipitoisuus on ollut tyypillisesti $>10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ja PAH(16)-summapitoisuus yli 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Honkanen, 2006; Piñeiro ym. 2021; Kozicki ja Nieslochowski, 2020).

Sisäilmanäytteissä PAH-yhdistekirjon pääkomponentteina olivat PAH(16)-yhdisteistä naftaleeni ja fenantreeni. Yhdessä kohteessa materiaaliperäisten PAH-yhdistepäästöjen pääkomponentti oli fenantreeni yksin, ilman naftaleenia. Tässä tapauksessa sisäilman naftaleenipitoisuus ei sovellu materiaaliperäisten PAH-yhdistepäästöjen indikattoriyhdisteeksi.

PAH(16)-listan ulkopuolisista yhdisteistä sisäilmassa todettiin yleisesti metyyli-naftaleeneja. Ilmanäytteissä ei todettu tilojen normaalissa käyttöolosuhteessa tai alipaineistuksen aikana haihtumattomia (hiukkasfaasin) PAH-yhdisteitä.

Alipaineen ja sisäilmaolosuhteiden vaikutus sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin

Alipaineistuksen aikana PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet nousivat tiloissa melko vähän, tasolle 1,4–2,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kahdessa tilassa sisäilman PAH-yhdistepitoisuus oli alipaineistustilanteessa hieman normaalitilannetta matalampi, mikä johtui alipaineistuksen ilmanvaihtuvuutta voimistavasta vaikutuksesta ja tilaan kulkeutuneen korvausilman suhteellisesta puhtaudesta. Alipainetilanteessa sisäilman PAH-yhdistekirjoissa ei tapahtunut suuria muutoksia. Alipaineen maltillinen vaikutus PAH-yhdisteiden pitoisuuksiin selittyy todennäköisesti sillä, että tutkituissa kohteissa haihtuvat PAH-yhdisteet ovat pitkälti päässeet tuulettumaan pois emittoivilta materiaalipinnoilta rakenteissa olevien ns. "vanhojen" ilmavuotoreittien varrelta (vrt. edellä mainittu emissioiden väheneminen pinnan lasittumisen takia). Tällaisissa tilanteessa päästöä rajoittava tekijä voi olla ilmavirtauksen suuruuden sijaan materiaalin pintaemission voimakkuus. Tilanteessa, jossa rakenteita rikotaan, jolloin rakenteisiin syntyy sekä "tuoreita" emittoivia materiaalipintoja että uusia ilmavuotoreittejä, päästöjen kasvu alipaineen vaikutuksesta olisi todennäköisesti huomattavasti suurempi. Esimerkki tällaisesta tilanteesta voisi olla ilmanvaihdon muutostyö, jossa PAH-yhdistepitoisiin rakennekerrokseen tehtäisiin uusia läpivientejä, rikottuja materiaalipintoja ei kapseloitaisi, eikä läpiviennin ilmatiiveydestä huolehdittaisi. Koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama alipaineisuus voisi tällöin aiheuttaa ilmavuotoja, joilla voisi olla merkittävä vaikutus sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin.

Lämpötilan vaikutus materiaalipäästöihin oli ilmeinen tapauksessa, jossa materiaali oli selvässä sisäilmayhteydessä, mutta vanhan, huokoisen materiaalin ollessa kyseessä siitä oli haihtunut naftaleeni ja muut kevyimmän PAH-yhdisteet. Tilan ollessa viileä sisäilman PAH-yhdistepitoisuus oli matala, mutta hellesäällä auringon lämmittäessä rakennetta materiaalista haihtui sisäilmaan hieman raskaampia haihtuvia PAH-yhdisteitä kuten fenantreenia, sekä vähäisemmässä määrin myös puoli haihtuvia PAH-yhdisteitä. Muutoin sisäilman tai rakenteen lämpötilalla ei todettu voimakasta yhteyttä sisäilmapitoisuuksiin.

Materiaalipinnan rikkoutumisen vaikutus sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin

PAH-yhdistepitoisten materiaalien rikkomisen vaikutusta sisäilmapitoisuuksiin tutkittiin PAH-yhdisteiden sisäilmanäytteenotolla rakenneavaustilanteessa. Rakenneavauksen aikana PAH(16)-yhdisteiden summapitoisuudet nousivat useissa tiloissa selvästi, tasolle 8,6–424 µg/m³. Voimakkain nousu tapahtui tilassa, jossa valuasfalttia irrotettiin vesijäähdytteisellä timanttiporauksella. Kahdessa tilassa pitoisuus *laski* rakenneavauksen aikana. Näissä tapauksissa materiaalin PAH-yhdistepitoisuudet olivat tutkituista näytteistä matalimmat. Lasku johtui rakenneavauksia varten tehdyn osastoinnin ja alipaineistavan tuuletuksen pitoisuuksia laimentavasta vaikutuksesta yhdistettynä materiaalin vähäiseen päästöön rikkoutuneenakin.

Rakenneavauksen aikana sisäilmasta mitattiin yleensä suurempi kirjo PAH-yhdisteitä normaalitilanteeseen verrattuna. Rakenneavausten aikana kahdessa tilassa todettiin sisäilma-
mittauksessa myös hiukkasfaasin yhdisteitä. Bentso[a]pyreenin sisäilmapitoisuudet olivat näissä tiloissa 0,21 µg/m³ ja 4,2 µg/m³. Tulokset korostavat materiaalin rikkomisen päästöjä ja haitallista altistumisriskiä kasvattavaa vaikutusta. Voimakkaiden sisäilmapäästöjen riski ja epäpuhtauksien leviäminen sekä kaasuihin että hiukkasmuodossa tulee huomioida aina PAH-yhdistepitoisia materiaaleja purettaessa. Purkutilanteissa tulee noudattaa kortin Ratu-kortin *82-0381 Kivihilipikeä sisältävien rakenteiden purku. Osastointimenetelmä* ohjeita (Rakennustieto, 2011). Lisäksi työntekijöiden suojaautuminen, pitäen sisällään sekä hengityksen-
suojaamisen että ihon suojaamisen, on oleellista näitä töitä tehdessä. On huomioitava, että PAH-yhdisteet voivat imeytyä elimistöön myös ihon kautta tai käsistä suuhun -reittiä.

Sisäilmassa aistittu PAH-yhdisteiden haju

Kirjallisuudessa esitetyn ristiriitaisen ja vanhentuneen tiedon takia tutkimuksessa määritettiin uudelleen naftaleeni hajukynnys ajantasaisin menetelmin hajupaneelin avulla. Hajukynnykseksi määritettiin 3,2 µg/m³. Tämä on noin 50 % pienempi kuin kirjallisuudesta löydetty pienin hajukynnysarvo naftaleenille (7 µg/m³).

Naftaleenin ja muiden PAH-yhdisteiden osuutta sisäilmasta aistittuihin hajuihin selvitettiin vertaamalla tutkituissa tiloissa tehtyjä aistinvaraisia havaintoja sisäilmasta mitattuihin PAH-yhdistepitoisuuksiin ja -kirjoon. Sisäilman naftaleenipitoisuus korreloi aineistossa heikosti sisäilmassa aistittujen hajujen kanssa. Naftaleenipitoisuus ei pääosin ylittänyt hajukynnyspitoisuutta 3,2 µg/m³ tiloissa, joissa kuitenkin havaittiin PAH-yhdisteiden hajua. Naftaleenin hajukynnystarkastelun perusteella todettiin, että tilassa voi olla selvästi aistittavaa PAH-yhdisteiden hajua, vaikka naftaleenin mitattu pitoisuus alittaisi hajukynnyn. Tällöin hajun aiheuttajana ovat naftaleenin sijaan tai lisäksi muut PAH-yhdisteet.

PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuus sisäilmassa korreloi jonkin verran naftaleenia paremmin hajuaistimusten kanssa. Karkeasti ottaen PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuden ylittäessä 10 µg/m³ PAH-yhdisteiden haju oli selvästi aistittavissa. PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuden ollessa < 10 µg/m³ sisäilmassa aistittujen hajujen voimakkuus vaihteli voimakkaasti. Tutkimusaineistossa tiloissa, joiden sisäilmassa esiintyi naftaleenien sijaan tai lisäksi fenantreeniä ym. raskaampia PAH-yhdisteitä, sisäilmassa aistittu PAH-yhdisteiden haju oli mitattuihin kokonaispitoisuuksiin nähden voimakas. Sen sijaan tiloissa, joiden sisäilmassa todettiin vain naftaleeneja, aistinvaraisesti arvioitu haju oli selvästi vähäisempi suhteessa mitattuihin kokonaispitoisuuksiin. Tällä perusteella ainakin joidenkin raskaampien PAH-yhdisteiden hajukynnys vaikuttaisi olevan naftaleenia matalampi. Aineisto oli hyvin pieni, joten asia tulee varmistaa suuremmalla aineistolla tai erillisin yhdistekohtaisin hajukynnystutkimuksin. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että sisäilmassa aistittuun,

rakennusmateriaaliperäiseen PAH-yhdisteiden hajuun vaikuttavat merkittävässä määrin myös muut PAH-yhdisteet kuin naftaleeni. Puhtaan naftaleenin haju ei tästä syystä sovellu PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien sisäilmavaikutusten indikaattoriksi.

PAH(16)-listan ulkopuoliset PAH-yhdisteet

Tutkimuksessa analysoitiin sisäilmanäytteistä PAH(16)-listan ulkopuolelta kahden metyyli-naftaleeniyhdisteen pitoisuudet. Materiaalinäytteistä selvitettiin vastaavien metyyli-naftaleenien ja lisäksi kuuden muun PAH(16)-listan ulkopuolisen yhdisteen pitoisuudet. Listan ulkopuolisia yhdisteitä todettiin materiaaleissa yleisesti, mutta niiden pitoisuudet olivat huomattavasti PAH(16)-listan yhdisteitä pienempiä. Metyyli-naftaleeneja, jotka ovat herkästi haihtuvia yhdisteitä, todettiin yleisesti paitsi materiaaleissa, myös sisäilmassa. Muut analysoidut PAH(16)-listan ulkopuoliset yhdisteet ovat pääosin haihtumattomia. Näitä ei tutkittu sisäilmasta, mutta haihtuvuusominaisuudet ja pienet materiaalipitoisuudet huomioiden yhdisteiden mahdollisten sisäilmavaikutusten arvioitiin olevan tavanomaisissa sisäilmaolosuhteissa todennäköisesti vähäisiä.

Koska PAH(16)-yhdistelistan ulkopuolisista yhdisteistä osalla on jonkinasteista haihtumispotentialiaa, näiden läsnäoloa sisäilmassa olisi suositeltavaa selvittää tarkemmin sisäilmanalyysien erillisessä tutkimushankkeessa. Puoli haihtuvia yhdisteitä voi olla sisäilmassa erityisesti tilanteissa, joissa PAH-yhdistepitoiseen materiaaliin/rakenteeseen kohdistuu poikkeavia lämpökuormia.

Tutkimuksen perusteella PAH(16)-yhdistelistan ulkopuolisia yhdisteitä todetaan materiaalinäytteissä todennäköisesti yleisesti. Koska yhdisteillä on vastaavia haittaominaisuuksia kuin PAH(16)-listan yhdisteillä, näiden huomioiminen jäteluokituksessa saattaisi olla perusteltua.

Tutkittavien PAH-yhdisteiden listaa tulisi tarkastella kriittisesti viranomaistyönä kaatopaikkakelpoisuuden näkökulmasta, sekä edellä ehdotettujen, puolihaihtuvien yhdisteiden esiintymistä kartoittavien tutkimusten tulosten perusteella tarvittaessa myös sisäilmavaikutusten näkökulmasta.

PAH-yhdistepitoisen materiaalin sisäilmariskien ja toimenpidetarpeiden arviointi

Tutkimuksen perusteella PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien PAH(16)-yhdisteiden summakonsentraatioiden perusteella ei voida arvioida suoraan materiaalista aiheutuvia sisäilmariskejä tavanomaisessa käyttötilanteessa.

Tämän tutkimuksen ja tutkijoiden aiemman empiirisen kokemuksen perusteella sisäilmapiitoisuuteen ja koettuun hajuun vaikuttavat materiaalissa olevien PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuuden lisäksi useat tekijät, kuten materiaalin sijainti, määrä ja pinta-ala, materiaalin sisältämien haihtuvien PAH-yhdisteiden määrät, PAH-yhdistepitoisen materiaalin huokoisuus ja materiaalipinnan eheys. Lisäksi tarkasteltavan tilan olosuhteet, kuten painesuhteet, ilmanvaihto ja lämpötila vaikuttavat materiaalipäästöihin ja edelleen sisäilmasta mitattaviin pitoisuuksiin ja koettuun hajuun. Rakenteiden sisällä olevaa PAH-yhdisteitä emittoivaa materiaalia ja huonetilaa rajaavan rakenteen PAH-yhdisteiden läpäisevyys (diffusiviteetti) ja ilmatiiveys vaikuttavat merkittävästi siihen, aiheutuuko materiaalista riskiä sisäilman laadulle vai ei. Tutkimuksen perusteella näillä on suurempi vaikutus sisäilmapiitoisuuksiin kuin materiaalin PAH-yhdistepitoisuudella. Ajan saatossa rakenteiden sisällä olevista PAH-yhdisteistä sisältävistä rakennusmateriaaleista on saattanut imeytyä PAH-yhdisteitä myös niiden viereisiin rakenteisiin. Kokemustemme mukaan PAH-yhdisteiden imeytyminen huokosiin materiaaleihin, kuten betoniin ja tiileen on kuitenkin huomattavasti hitaampaa, kuin esimerkiksi öljyhiilivedyillä. Rakenteiden sisällä olevat PAH-yhdistepitoiset rakennusmateriaalit voivat vaikuttaa sisäilman laatuun suoraan ilmavuoreittien kautta, joten ne tulee selvittää

kuntotutkimuksissa. Rakenteiden sisäiset PAH-yhdistepitoiset materiaalit täytyy myös huomioida esimerkiksi uusien läpivientien suunniteltaessa. Edellä esitetyt seikat vaikuttavat myös mahdollisiin PAH-yhdistepäästöjen hallintatapoihin.

PAH-yhdistepitoisten materiaalien sisäilmavaikutusten, toimenpidetarpeen ja sopivien korjaustapojen arviointi tulee tehdä kokonaisvaltaisen tarkastelun perusteella huomioiden edellä esitetyt seikat. Etenemismalli on kuvattu tämän raportin kohdassa 4.7.

Tutkimuksen perusteella rakenteissa olevien materiaalien PAH-yhdisteiden sisäilmariskit voidaan arvioida sisäilmamittauksella, kunhan mittaukset tehdään edustavissa olosuhteissa. Mittauksissa tulee huomioida mahdollinen ajallinen ja tilakohtainen vaihtelu erityisesti lämpöolosuhteissa, mutta myös esimerkiksi ilmanvaihdon toimivuudessa sekä rakenteiden toteutuksessa ja ilmatiiveydessä, sillä nämä voivat vaikuttaa merkittäväällä tavalla sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksiin.

Rakennusmateriaaliperäisten PAH-yhdisteiden terveysriskit rakennusten normaalissa käyttötilanteessa ja purkutöiden aikana

Tutkimuksen perusteella materiaalien sisältämät PAH-yhdisteet ovat harvoin sisäilmariski, jos rakenteet ovat ehjät ja ilmanvaihto kunnossa. Erittäin korkeatkaan rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden pitoisuudet eivät yleensä nosta haihtuvien PAH-yhdisteiden pitoisuuksia sisäilmassa terveydelle haitalliselle tasolle normaaleissa rakennusten käyttötilanteissa. Tavallisimmat sisäilmasta mitatut PAH-yhdisteet, naftaleeni ja fenantreeni (ja metyyli-naftaleenit), ovat syöpävaaran suhteen vähemmän huolta herättäviä verrattuna huonosti haihtuviin, suuremman molekyylipainon PAH-yhdisteisiin. Naftaleenin kohdalla on katsottu, että pysyttäessä ilmapitoisuuden $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alapuolella terveysriskit, mukaan lukien syöpäriski, ovat minimaalisia/olemattomia (Umweltbundesamt, 2023). Fenantreenille ei ole asetettu erikseen terveysperusteisia raja-arvoja sisäilmalle Suomessa tai muualla Euroopassa. Sen syöpävaarallisuus on kuitenkin epävarma – se näyttäisi olevan maksimissaan hyvin heikko syöpävaarallinen aine – eikä siis ole näyttöä siitä että se olisi naftaleenia potentimpi tässä suhteessa. Muiden haihtuvien PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat edellä mainittuja huomattavasti matalampia. Suuremman molekyylipainon yhdisteitä ei normaaleissa rakennusten käyttötilanteissa todettu sisäilmassa määritysrajan ylittävinä pitoisuuksina. Ainoana poikkeuksena oli kohde, jossa auringon lämmittämien ulkoseinien tervapahvista emittoitui haihtuvien yhdisteiden lisäksi pieninä määrinä myös puoli haihtuvia PAH-yhdisteitä.

PAH-yhdisteiden haju voi aiheuttaa viihtyvyshaittaa matalillakin pitoisuuksilla. Hajukynnys ja viihtyvyshaitat ovat yksilöllisiä. Aistiärsytyksen aiheuttama viihtyvyshaitta voi voimakkaana ja pitkittyessään johtaa välillisiin elimellisiin haittavaikutuksiin. (Airaksinen ym., 2023)

Terveydellisesti haitallisia PAH-pitoisuuksia saattaa kuitenkin syntyä, kun rakenteita lähde-tään avaamaan. Tällöin on riski myös ihokontaktille, mikäli ihon huolellisesta suojaamisesta ja hyvistä työhygieenisistä käytännöistä materiaaleja käsiteltäessä ei pidetä huolta. Kokonaisriskin kannalta oleellista on kuitenkin kumulatiivinen altistuminen, minkä takia olemassa olevat raja-arvotkin on asetettu ajatellen pitkäaikaista, koko työuran aikaista altistumista. Bentso[a]pyreenille PAH-altistumisen markerina ollaan EU:ssa asettamassa sitovaa raja-arvoa, joka tulee jatkossa (sen astuttua voimaan) huomioida tehtäessä saneeraustöitä rakennuksissa, jotka sisältävät PAH-yhdisteitä sisältäviä materiaaleja. Tuleva EU-raja-arvo tulee todennäköisesti olemaan selkeästi matalampi kuin tällä hetkellä voimassa oleva bentso[a]pyreenin HTP-arvo.

Lähteet

AIHA. 1989. Odor Thresholds for Chemicals with Established Health Standards, 2nd Edition. American Industrial Hygiene Association. Taulukko 6.1.

Airaksinen R, Salmela A ja Pitkäranta M. 2023. Kivihiilitervatuotteet asuinrakennuksissa. Tutkimuksesta tiiviisti -julkaisusarja. Terveystieteiden tutkimuskeskus ja hyvinvoinnin laitos.

Ambrose CT. 2018. The Conquest of Pus - a History of Bitumen, Creosote, and Carboic Acid. Journal of infectious diseases & preventive medicine. vol 6:2.

ASTM International. 2019. E679-19 standard practice for determination of odor and taste thresholds by a forced-choice ascending concentration series method of limits. West Conshohocken, PA: ASTM.

Backlund P, Lappalainen K ja Kuusisto K. 2009. Emissiotestausmenetelmien vertailua – FLEC ja μ -CTE. Sisäilmayhdistyksen Raportti 27. s. 351–356.

BEUC (the European Consumer Organization). 2023. Ubiquitous but preventable: harmful chemicals in everyday consumer products. Compilation of tests by consumer organisations between 2017 and 2023 underscores need for better EU chemicals legislation. Verkkojulkaisu, Saatavilla: https://www.beuc.eu/sites/default/files/publications/BEUC-X-2023-129_Harmful_chemicals_in_everyday_consumer_products.pdf Luettu 3.11.2023

Bokowa AH ja Bokowa M. 2014. Estimation of Odour Detection Threshold Values For Selected Pure Compounds. In Odors and Air Pollutants Conference 2014. Water Environment Federation.

Bolin CA ja Smith ST. 2013. Life Cycle Assessment of Creosote-Treated Wooden Railroad Crossties in the US with Comparisons to Concrete and Plastic Composite Railroad Crossties. Journal of Transportation Technologies, Vol. 3 No. 2, 13 pp.

Derudi M, Gelosa S, Slipevich A, ym. 2014. Emission of air pollutants from burning candles with different composition in indoor environments. Environ Sci Pollut Res Int 21(6): 4320-30.

EC. 2010. Creosote (PT8). Assessment report. Directive 98/8/EC concerning the placing of biocidal products on the market.

ECHA (European chemicals agency). 2018a. Note on reference dose-response relationship for the carcinogenicity of pitch, coal tar, high temperature and on PBT and vPvB properties. ECHA. Helsinki, 8.6.2018.

ECHA (European chemicals agency). 2018b. Substance evaluation conclusion as required by REACH Article 48 and Evaluation report for Naphthalene.

ECHA (European chemicals agency). 2022. Committee for Risk Assessment RAC Opinion on scientific evaluation of occupational exposure limits for polycyclic aromatic hydrocarbons ECHA/RAC/OEL-O-0000007198-66-01/F. 1.12.2022.

ECHA (European chemicals agency). 2024. ECHA kemikaalitetokanta, <https://echa.europa.eu/fi/substance-information>. Luettu 21.2.2024. ECHA (European chemicals agency). ECHA C&L-luettelon tietokanta, <https://echa.europa.eu/fi/information-on-chemicals/cl-inventory-database>.

EN 16516:2017 Construction products: Assessment of release of dangerous substances – Determination of emissions into indoor air.

EPA (US Environmental Protection Agency). 1986. Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods. Washington, D.C. Saatavilla: <https://www.epa.gov/hw-sw846>.

EPA (US Environmental Protection Agency). 2023. Potency Factors for Carcinogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Regional Screening Levels (RSLs)-User's Guide. Päivitetty marraskuussa 2023. Luettu 12/2023. Saatavilla: <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-users-guide#toxicity>

EU (Euroopan Unioni). 2008. Directive 98/8/ec of the european parliament and of the council of 16 February 1998 concerning the placing of biocidal products on the market.

EU (Euroopan Unioni). 2009. Regulation (ec) no 1223/2009 of the european parliament and of the council of 30 November 2009 on cosmetic products.

EU (Euroopan Unioni). 2011. EU Commission regulation No 835/2011 of 19 August 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for polycyclic aromatic hydrocarbons in foodstuffs. Official Journal of the European Union.

EU (Euroopan Unioni). 2012. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 528/2012 biosidivalmisteiden asettamisesta saataville markkinoilla ja niiden käytöstä.

EU (Euroopan Unioni). 2014. Directive 2004/107/ec of the European parliament and of the council relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Official journal of the European Union. Strasbourg.

Gernandt, EC. 1892. Hintaluettelo.

Hakola H, Vestenius M, Saari H, ym. 2009. Polysyklisten aromaattisten hiilivetyjen (pah) pitoisuudet ulkoilman pm10 -hiukkasissa Kuopion Niiralassa jaksolla marraskuu 2008 - maaliskuu 2009. Ilmatieteen laitos.

Helsingin Asfaltti-osakeyhtiö, 1902. Esite.

Herranen T. 1985. Kaasulaitostoimintaa Helsingissä 1860–1985. Helsingin kaupunki.

Honkanen H, Riala R ja Kokotti H. 2006. Volatile polycyclic aromatic hydrocarbons in coal tar pitch of water barrier in floors and in ceiling of an old office building and IAQ. AIVC 2006, 2, 267–270.

Häsänen E, Pohjola V, Pyysalo H, ym. 1983. Polysykliset aromaattiset hiilivedyt saunan ilmassa. – Sauna 1983: 1, s. 6–12.

Häsänen E, Pohjola V, Pyysalo H, ym. 1984. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Finnish sauna air. The Science of the total environment. 37. 223-31.

IARC (International Agency for Research on Cancer). 2011. Bitumens and Bitumen emissions, and some N- and S-Heterocyclic Polycyclic aromatic Hydrocarbons. Volume 103 IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, International Agency for Research on Cancer.

IARC (International Agency for Research on Cancer). 2013. Bitumens and Bitumen emissions, and some N- and S-Heterocyclic Polycyclic aromatic Hydrocarbons. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol 103. Lyon, Ranska.

- IARC (International Agency for Research on Cancer). 1985. Polynuclear aromatic compounds, Part 4, Bitumens, Coal-tars and Derived Products, Shale-oils and Soots. IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Vol. 35. Ranska.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). 2024. Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–135. Päivitetty 31.1.2024. Luettu 21.2.2024. Saatavilla: <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>
- ISO. 2006. ISO 16000-9 "Indoor air–Part 9: Determination of the Emission of Volatile Organic Compounds from Building Products and Furnishing-Emission Test Chamber Method" (ISO 16000-9: 2006).
- Iwasaki Y, Fukushima H, Nakaura H, ym. 1978. A new method for measuring odors by triangle odor bag method (I) Measurement at the source. Journal of Japan Society of Air Pollution, 13(6), 246-251.
- Johnston G. 2014. Characterization of bacterial communities of riverbank sediments contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. Väitöskirja. Kent State University, USA.
- Kang DH, Choi DH, Won D, ym. 2012. Household materials as emission sources of naphthalene in Canadian homes and their contribution to indoor air. Atmospheric Environment, 50, 79–87.
- Kekkonen J. 1946. Rakennusaineoppi. Toinen, uusittu painos. Otava. Helsinki.
- Koivikko R, Parshintsev E, Kammonen O, ym. 2022. Laboratorioiden välinen vertailumittaus 14/2022. Materiaalinäytteet PAH-määrytykset. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 15/2023.
- Komulainen J, Sallinen P, Parshintsev J, ym. 2018. Rakennusmateriaaliperäisten PAH-yhdisteiden vaikutus sisäilman laatuun. Sisäilmastoseminaari 2018. Sisäilmayhdistys. 395–400.
- Kozicki M ja Niesłochowski A. 2020. Materials contamination and indoor air pollution caused by tar products and fungicidal impregnations: Intervention research in 2014–2019. Sensors 20 (15), 4099.
- Leivuori M, Parshintsev E, Kammonen O, ym. 2023. Interlaboratory comparison 05/2023. PAH measurements from indoor air samples. Reports of the Finnish Environment Institute 37, 2023.
- Leino K, Hovi H ja Parshintsev E. 2020. Kuinka arvioida materiaaliemissioiden vaikutusta sisäilman kemialliseen laatuun? Sisäilmayhdistyksen Raportti 38. s. 69–76.
- Liikkanen L. 2017. Pitäkö saunominen lääkäriin loitolla? Saunan pitkäaikaisia terveysvaikutuksia, päivitetty 01.02.2017. Saunologia-blogi. <https://saunologia.fi/sauna-ja-terveys-2/>
- Markes International. 2011. Micro-Chamber/Thermal Extractor (μ-CTE), Operator´s manual, version 3.5, Markes International Ltd, Llantrisant, Iso-Britannia.
- Nagata Y ja Takeuchi N. 2003. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method. Odor measurement review, 118, 118-127.
- NTP (National Toxicology Program). 2021. Coal Tars and Coal-Tar Pitches. CAS No. 8007-45-2 (Coal Tar). Teoksessa: Report on Carcinogens, Fifteenth Edition. National Toxicology Program, Department of Health and Human Services.

- N.N. 1879. Kiwihiilet. Suomen kuvalehti, no. 160. Suomalaisen Kirjallisuuden seuran kirjapaino.
- N.N. 1879 b. Kiwihiilet (jatkoa edellisestä numerosta). Suomen kuvalehti, no. 161. Suomalaisen Kirjallisuuden seuran kirjapaino.
- Orecchio S. 2011. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor emission from decorative candles. *Atmospheric Environment* 45(10) 1888-1895.
- Piñeiro R, Jimenez-Relinque E, Nevshupa R, ym. 2021. Primary and Secondary Emissions of VOCs and PAHs in Indoor Air from a Waterproof Coal-Tar Membrane: Diagnosis and Remediation. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 12855.
- Pyhälä E. 1927. Bitumit ja niiden käytäntö rakennusteollisuudessa. *Rakennustaito*. Suomen rakennusmestariiliiton ammattilehti. Helsinki.
- Rakennustieto. 2011. Ratu 82-0381 Kivihiilipikeä sisältävien rakenteiden purku. Osastointimenetelmä.
- Rakennustieto. 2022a. RT 103501. Haitalliset aineet rakennuksissa - Tutkijan ohje.
- Rakennustieto. 2022b. RT-103500. Haitalliset aineet rakennuksissa - Tilaajan ohje.
- Rakennustietosäätiö RTS. 2017. M1 Emission Classification of Building Materials: Protocol for Chemical and Sensory Testing of Building Materials. Version 15.11.2017. Saatavilla: <https://cer.rts.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus-m1/>
- REACH 2008. Coal-tar pitch, high temperature. Summary risk assessment report. Environment. Bureau Reach, Netherlands, 2008.
- Ruth JH. 1986. Odor thresholds and irritation levels of several chemical substances: a review. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(3), A-142.
- Schönach P. 2008. Kaupungin savut ja käryt. Helsingin ilmansuojelu 1945-1982. Väitöskirja. Helsingin yliopisto. Valtiotieteellinen tiedekunta, Yhteiskuntapolitiikan laitos. Yhteiskuntapolitiikan laitoksen tutkimuksia 1/2008.
- Shell Oy. 1938. Mexphalt jäähdytysuoneitten eristämiseen. Mexphalt-työohjeita N:o 4. K. F. Puromiehen kirjapaino O.Y.
- Sievola J. 2010. Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n diffusiviteettitutkimuksia (ei julkaistu).
- Sinisalo H, Ylinen K, Santonen T, Evgeny Parshintsev E. 2023. Turvallinen museotyö. Opas museotyöympäristöjen kemiallisten ja biologisten vaaratekijöiden hallintaan. Työterveyslaitos.
- St Croix Sensory, Inc. 2005. A review of the Science and Technology of Odor Measurement. Prepared for the Iowa Dep. of Nat. Resources. Saatavilla: <https://publications.iowa.gov/id/eprint/34888>
- STM. 2015. STMa 545/2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksesta. Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki.
- STM. 2020. HTP-ARVOT 2020 Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki.
- Smith ST. 2020. History, use and health effects of creosote. Crossties.

- Stigell RV, Vartiainen A, Pajari K, Kauppi J (toim.). 1947. Tavarasanakirja, Werner Söderström Osakeyhtiö. Porvoo ja Helsinki.
- Stempel Z. 2018. 2018 European coal tar and coal tar distillation market overview: "Business as usual". Esitysaineisto International tar association 2018 annual conference, San Francisco, 17.-18.9.2018.
- Stout SA, Uhler AD ja Boehm PD. 2001. Recognition of and Allocation Sediments. Environmental Claims Journal/Vol. 13, No. 4.
- Townsend CA. 2003. Coal tar before the invention of towns gas. Teoksessa: chemicals from coal a history of beckton products works. E-artikkeli. Greater london industrial archaeology society.
- Tullilaitos. 1900. Suomen kauppa ja laivaliike venäjän ja ulkovaltojen kanssa sekä tullilaitoksen ylöskanto vuonna 1899. Suomenmaan virallinen tilasto. Helsingissä, keisarillisen senaatin kirjapainossa, 1900.
- Työterveyslaitos. 2010/2016. PAH-yhdisteiden tavoitetasoperustelumuuisto. Muistio on päivitetty 2012 ja 2016.
- Työterveyslaitos. 2022. Perustelumuuisto PAH-altistumisen biologisen altistumisindikaattorin 1-pyrenolin ohjeraja-arvolle.
- Työterveyslaitos. 2023. Työterveyslaitoksen viitearvot sisäilman Kemiallisille yhdisteille ja mikrobeille. Päivitetty 11.10.2023.
- Umweltbundesamt. 2023. German Committee on Indoor Guide Values. Päivitetty 31.3.2023.
- Valvira (Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto). 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje Osa III, Asumisterveysasetus § 14–19 Ohje 8/2016.
- Van Harreveld AP, Heeres P ja Harssema H. 1999. A review of 20 years of standardization of odor concentration measurement by dynamic olfactometry in Europe. Journal of the Air & Waste Management Association, 49(6), 705–715.
- V. N. 1884. Tervasta ja muista puuaineen tislauustuotteista. Suomen Teollisuuslehti no. 24. Simeliuksen perillisten kirjapaino.
- Wahlström M, Laine-Ylijoki J, Vestola E, ym. 2006 Jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden toteaminen. Ympäristöhallinnon ohjeita 2–2006, s. 35.
- Wallenius K, Korkalainen M, Porras S, ym. 2023. Sisäympäristöissä esiintyvät puoli haihtuvat orgaaniset yhdisteet (SVOC) - väestön altistuminen ja terveysriski. Työterveyslaitos.
- Weijo ym. 2019. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriön julkaisu 2019:18. Ympäristöministeriö.
- WHO. 1998. Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons. Environmental Health Criteria 202. Geneva: World Health Organization.
- Wuokko P, Pitkäranta M, Sekki P ja Komulainen J. 2023. Rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden tutkiminen ja niiden vaikutus sisäilmaan. Teoksessa: Vinha J ja Raunima T (toim.) Rakennusfysiikka 2023. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, 24.–26.10.2023, Tampere, Osa 1. Tampereen yliopisto.
- YTV. 2009. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2008. Helsinki: YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta.

Vna 331/2013. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista.

Vnp 1405/1995. Valtioneuvoston päätös kreosootin ja sillä käsitellyn puun käytön sekä markkinoille luovuttamisen rajoittamisesta.

Ympäristöministeriö. 2019. Jätteen luokittelu vaaralliseksi jätteeksi – päivitetty opas. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:2.

Tämän julkaisun viite:

Komulainen J, Pitkäranta M, Sekki P, Wuokko P, Helin A, Parshintsev E, Santonen T. 2024. Rakennusmateriaalien sisältämien PAH-yhdisteiden vaikutus sisäilmalaatuun. PAHSIS-tutkimushankkeen loppuraportti.

Rakennusmateriaalinäytteiden PAH(16)-analyysien tulokset

Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen rakennusmateriaalien PAH(16)-yhdistepitoisuudet, 2- ja 1- metyyliinaftaleeni sekä listan ulkopuoliset PAH-yhdisteet.

Taulukko 1. Tutkittujen hankkeessa tutkittujen rakennusmateriaalien PAH(16)-yhdistepitoisuudet, 2- ja 1- metyyliinaftaleeni sekä listan ulkopuoliset PAH-yhdisteet

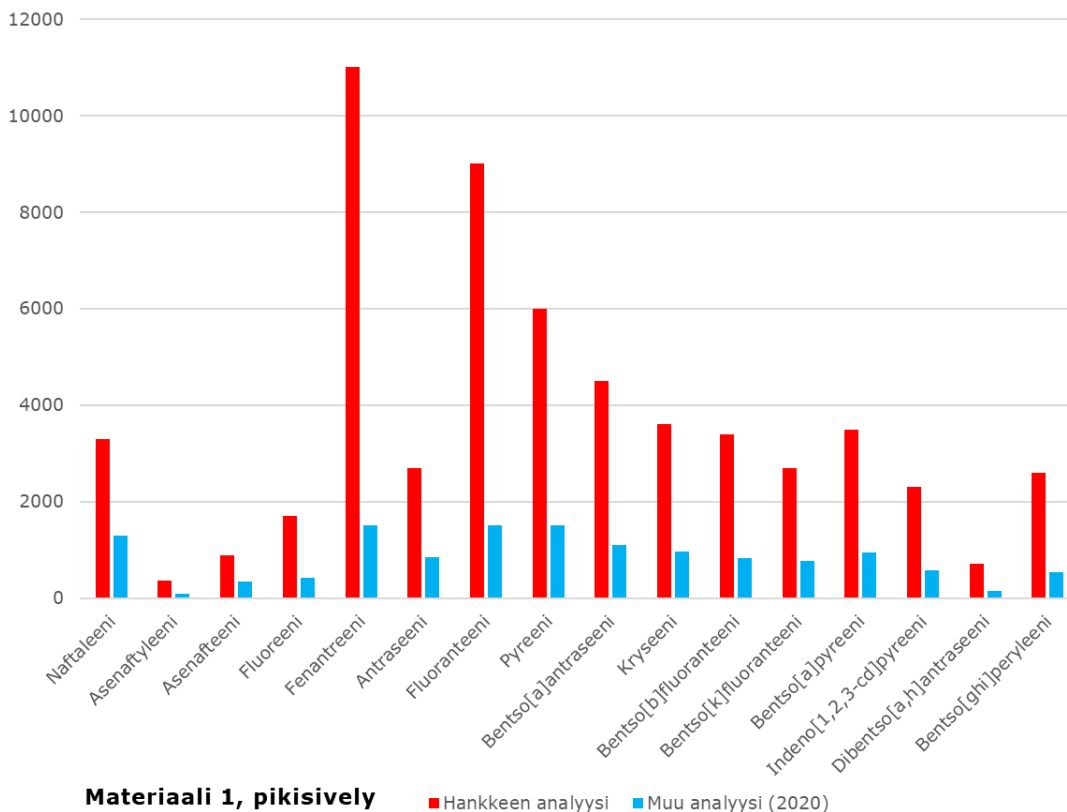
Materiaali / tila	1, pikisively, tila 1.1	2, valuasfaltti, tila 3.1.1	5, bitumiliima, tila 4.2.1	3, tervapaperi, tila 3.2.1	4, korkkilevy, tila 4.1.1	6, tervapahvi, tila 5.1
PAH-yhdiste	Massamaiset materiaalit [mg/kg]			Huokoiset materiaalit [mg/kg]		
Naftaleeni	3 300	2200	< 1,0	< 10	63	< 23
2-Metyyliinaftaleeni	600	350	< 1,0	9	30	7,9
1-Metyyliinaftaleeni	320	170	< 1,0	8,5	22	< 4,7
Asenaftyleeni	370	31	1,4	190	17	300
Asenafteeni	880	410	20	7	250	8,3
Fluoreeni	1 700	360	4,5	35	170	74
Fenantreeni	11 000	2 000	300	850	3 700	2 400
Antraseeni	2 700	350	69	240	820	1 000
Fluoranteeni	9 000	3 000	410	1 400	6 400	2 800
Pyreeni	6 000	2 700	280	1 400	4 200	3 000
Bentso[a]antraseeni	4 500	2 500	260	1 200	3 300	1 600
Kryseeni	3 600	2 500	200	1 000	3 400	1 600
Bentso[b]fluoranteeni	3 400	2 200	180	860	2 700	1 100
Bentso[k]fluoranteeni	2 700	1 700	180	820	2 300	1 300
Bentso[a]pyreeni	3 500	2 300	180	940	2 300	1 800
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	2 300	1 400	160	630	1 600	1 100
Dibentso[a,h]antraseeni	720	560	46	190	860	430
Bentso[ghi]peryleeni	2 600	1 200	110	530	1 200	1 100
PAH(16)-summa	59 000	26 000	2 400	11 000	34 000	20 000
7H-bentso(c)fluoreeni	325	155	<4	131	223	169
5-metyylikryseeni	135	167	<15	140	151	180
dibentso(a,l)pyreeni	881	973	92	559	1 232	570
dibentso(a,e)pyreeni	528	460	39	320	1 075	363
dibentso(a,i)pyreeni	232	186	14	163	510	131
dibentso(a,h)pyreeni	303	161	10	102	505	115

Rakennusmateriaalinäytteiden PAH(16)-rinnakkaisanalyysien tulokset (laboratoriovertailu)

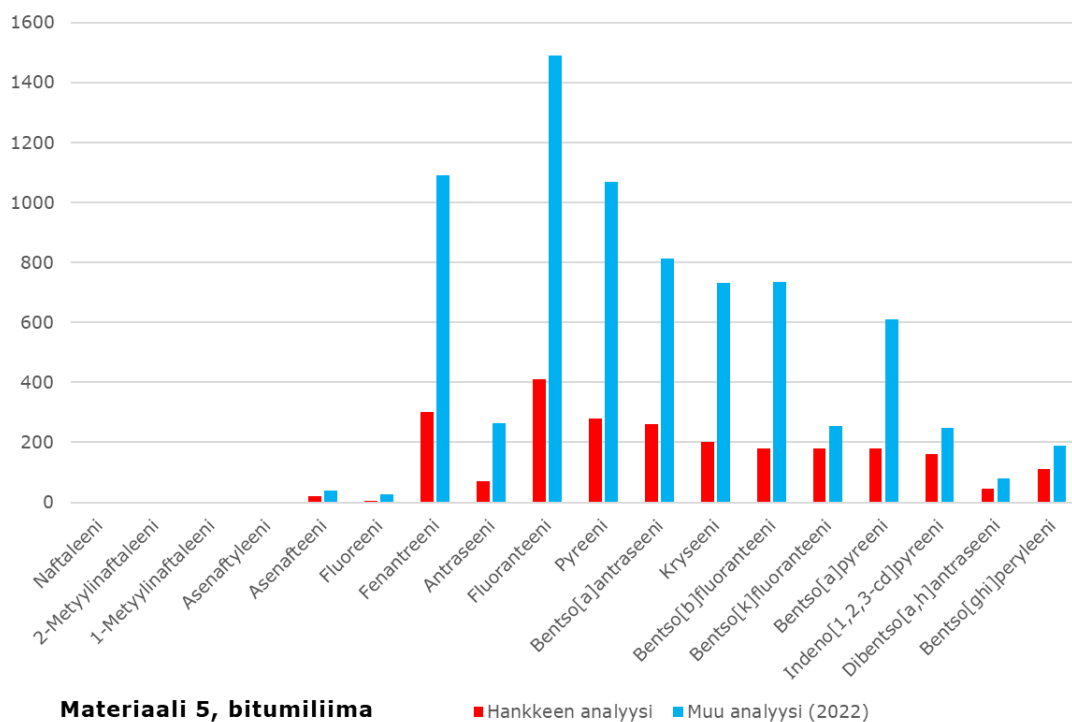
Taulukoissa 2–5 on esitetty materiaalinäytteiden PAH(16)-pitoisuusanalyysien (mg/kg) tulokset sekä käytössä olleet aiempien, samasta materiaalista tehtyjen analyysien tulokset. Näytteiden 2 ja 6 pitoisuusanalyysille on tehty lisäksi tässä tutkimuksessa erillinen vertailukoe neljässä laboratoriossa.

Taulukko 2. Materiaalinäytteiden 1 ja 5 PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

Materiaali / kohde	Materiaali 1, pikisively (Kohde 1)		Materiaali 5, bitumiliima (Kohde 4)	
	Hankkeen tutkimus	Muu tutkimus (2020)	Hankkeen analyysi	Muu tutkimus (2022)
PAH-yhdiste	Massamaiset materiaalit [mg/kg]			
Naftaleeni	3 300	1 300	<1,0	0,3
2-Metyyli-naftaleeni	600		<1,0	
1-Metyyli-naftaleeni	320		<1,0	
Asenaftyleeni	370	99	1,4	0,9
Asenafteeni	880	340	20	39
Fluoreeni	1 700	420	4,5	28
Fenantreeni	11 000	>1 500	300	1 090
Antraseeni	2 700	840	69	263
Fluoranteeni	9 000	>1 500	410	1 490
Pyreeni	6 000	>1 500	280	1 070
Bentso[a]antraseeni	4 500	1 100	260	812
Kryseeni	3 600	970	200	732
Bentso[b]fluoranteeni	3 400	830	180	735
Bentso[k]fluoranteeni	2 700	780	180	255
Bentso[a]pyreeni	3 500	940	180	610
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	2 300	580	160	247
Dibentso[a,h]antraseeni	720	150	46	79
Bentso[ghi]peryleeni	2 600	530	110	188
PAH(16)-summa	59 000	>14 000	2 400	7 640



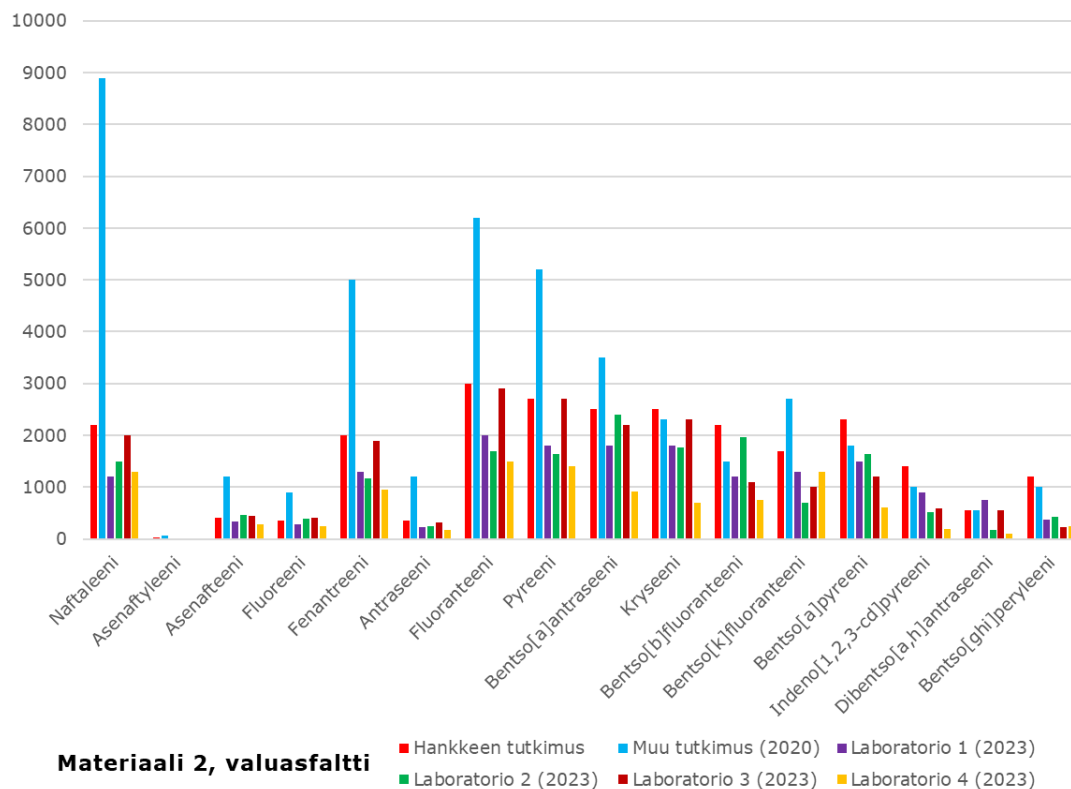
Kuva 1. Materiaalin 1 materiaalipitoisuusanalyysien tulokset tässä tutkimuksessa, sekä vuonna 2020 tehdyssä tutkimuksessa. Vuonna 2020 tehdyssä tutkimuksessa käytetty analyysilaboratorio käytti yksittäisille PAH-yhdisteille cut-off-arvona 1 500 mg/kg.



Kuva 2. Materiaalin 5 materiaalipitoisuusanalyysien tulokset tässä tutkimuksessa, sekä vuonna 2022 tehdyssä tutkimuksessa.

Taulukko 3. Materiaalinäytteen 2 PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

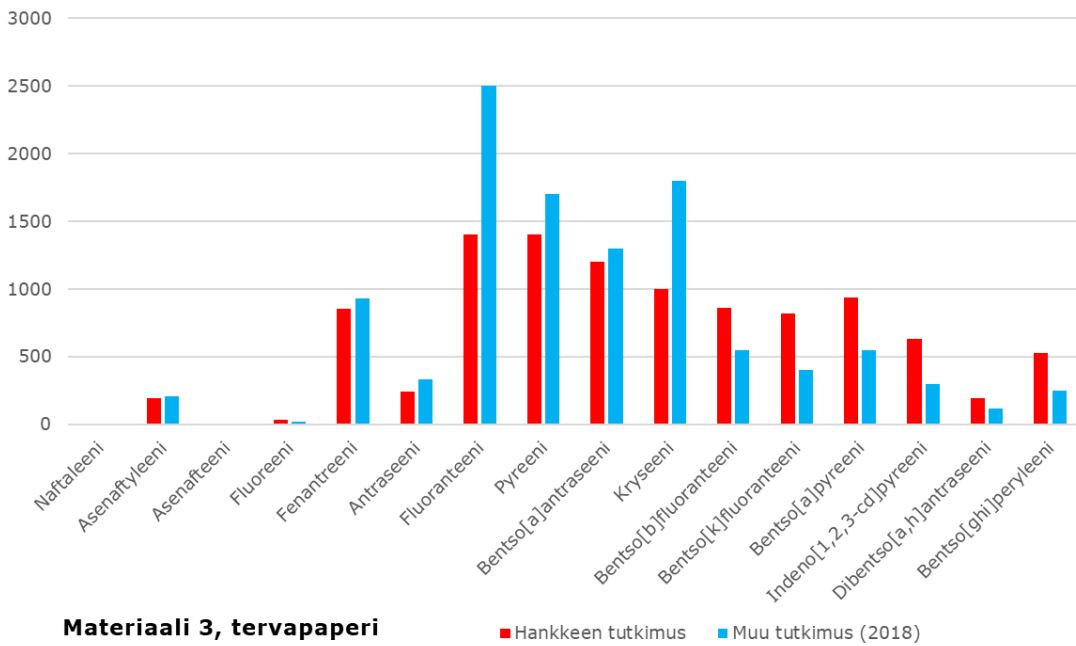
Materiaali / kohde	Materiaali 2, valuasfaltti (Kohde 3)					
	Hankkeen tutkimus	Muu tutkimus (2020)	Lab1 (2023)	Lab2 (2023)	Lab3 (2023)	Lab4 (2023)
PAH-yhdiste	Massamaiset materiaalit [mg/kg]					
Naftaleeni	2 200	8 900	1 200	1 500	2 000	1 300
2-Metyyli-naftaleeni	350	1 600				
1-Metyyli-naftaleeni	170	820				
Asenaftyleeni	31	71	9	1	5	1
Asenaftteeni	410	1 200	330	471	450	280
Fluoreeni	360	900	280	383	400	250
Fenantreeni	2 000	5 000	1 300	1 160	1 900	960
Antraseeni	350	1 200	220	246	310	180
Fluoranteeni	3 000	6 200	2 000	1 700	2 900	1 500
Pyreeni	2 700	5 200	1 800	1 630	2 700	1 400
Bentso[a]antraseeni	2 500	3 500	1 800	2 400	2 200	910
Kryseeni	2 500	2 300	1 800	1 760	2 300	700
Bentso[b]fluoranteeni	2 200	1 500	1 200	1 970	1 100	750
Bentso[k]fluoranteeni	1 700	2 700	1 300	702	1 000	1 300
Bentso[a]pyreeni	2 300	1 800	1 500	1 630	1 200	600
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	1 400	1 000	900	519	590	200
Dibentso[a,h]antraseeni	560	560	750	172	560	100
Bentso[ghi]peryleeni	1 200	1 000	370	419	220	240
PAH(16)-summa	26 000	43 031	17 000	16 700	20 000	12 000



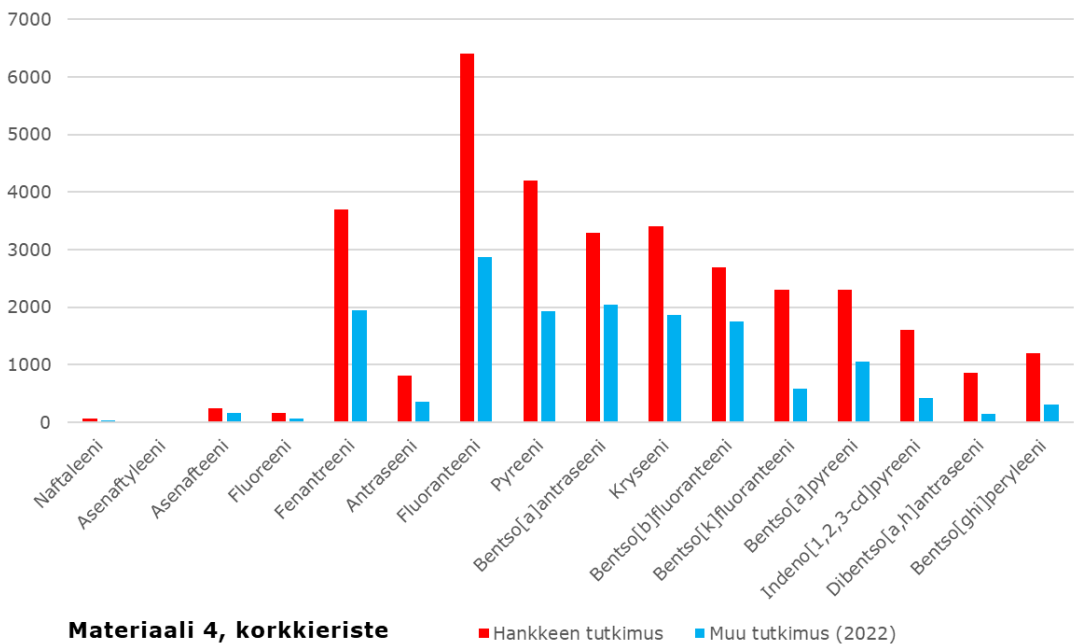
Kuva 3. Materiaalin 2 materiaalipitoisuusanalyysien tulokset tässä tutkimuksessa, vuonna 2020 tehdyssä tutkimuksessa sekä tässä tutkimuksessa tehdyssä neljän laboratorion vertailukokeessa.

Taulukko 4. Materiaalinäytteiden 3 ja 4 PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

Materiaali / kohde	Materiaali 3, tervapaperi (Kohde 3)		Materiaali 4, korkkilevy (Kohde 4)	
	Hankkeen tutkimus	Muu tutkimus 2018	Hankkeen tutkimus	Muu tutkimus 2022
PAH-yhdiste	Huokoiset materiaalit [mg/kg]			
Naftaleeni	<10	5,10	63	42
2-Metyyli-naftaleeni	9		30	
1-Metyyli-naftaleeni	8,5		22	
Asenaftyleeni	190	210	17	3
Asenaftteeni	7	8	250	160
Fluoreeni	35	17	170	74
Fenantreeni	850	930	3 700	1 940
Antraseeni	240	330	820	355
Fluoranteeni	1 400	2 500	6 400	2 880
Pyreeni	1 400	1 700	4 200	1 930
Bentso[a]antraseeni	1 200	1 300	3 300	2 040
Kryseeni	1 000	1 800	3 400	1 860
Bentso[b]fluoranteeni	860	550	2 700	1 750
Bentso[k]fluoranteeni	820	400	2 300	593
Bentso[a]pyreeni	940	550	2 300	1 060
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	630	300	1 600	428
Dibentso[a,h]antraseeni	190	120	860	148
Bentso[ghi]peryleeni	530	250	1 200	306
PAH(16)-summa	11 000	11 000	34 000	15 600



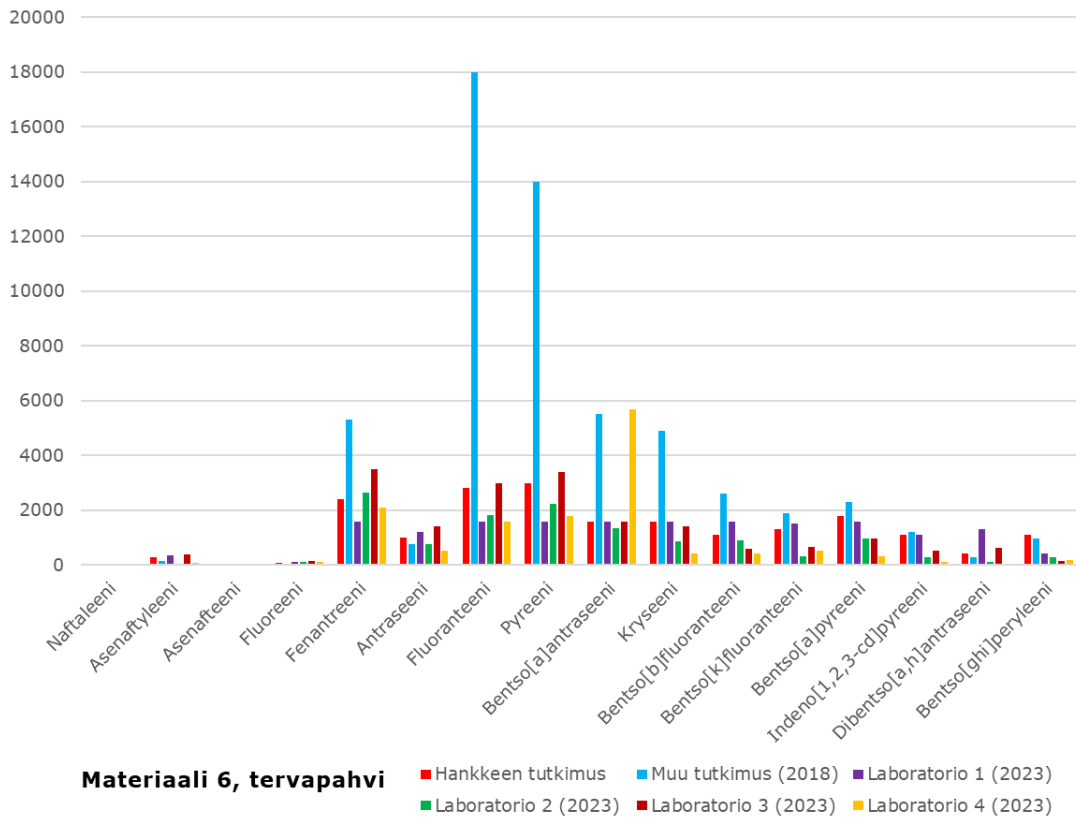
Kuva 4. Materiaalin 3 materiaalipitoisuusanalyysien tulokset tässä tutkimuksessa, sekä vuonna 2018 tehdyssä tutkimuksessa.



Kuva 5. Materiaalin 4 materiaalipitoisuusanalyysien tulokset tässä tutkimuksessa, vuonna 2022 tehdyssä tutkimuksessa.

Taulukko 5. Materiaalinäytteen 6 PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

Materiaali / kohde	6, tervapahvi (Kohde 5)					
	Hankkeen tutkimus	Muu tutkimus (2018)	Lab1 (2023)	Lab2 (2023)	Lab3 (2023)	Lab4 (2023)
PAH-yhdiste	Huokoiset materiaalit [mg/kg]					
Naftaleeni	<23	7,1	>34	15	21	2
2-Metyyli-naftaleeni	7,9					
1-Metyyli-naftaleeni	<4,7					
Asenaftyleeni	300	140	370	42	380	97
Asenaftteeni	8,3	<5,0	11	4	8	>0,1
Fluoreeni	74	21	110	129	140	98
Fenantreeni	2 400	5 300	1 600	2 630	3 500	2 100
Antraseeni	1 000	770	1 200	760	1 400	540
Fluoranteeni	2 800	18 000	1 600	1 840	3 000	1 600
Pyreeni	3 000	14 000	1 600	2 220	3 400	1 800
Bentso[a]antraseeni	1 600	5 500	1 600	1 330	1 600	5 700
Kryseeni	1 600	4 900	1 600	873	1 400	420
Bentso[b]fluoranteeni	1 100	2600	1 600	907	580	410
Bentso[k]fluoranteeni	1 300	1 900	1 500	323	660	530
Bentso[a]pyreeni	1 800	2 300	1 600	970	970	330
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	1 100	1 200	1 100	283	510	100
Dibentso[a,h]antraseeni	430	300	1 300	98	620	57
Bentso[ghi]peryleeni	1 100	960	410	278	150	170
PAH(16)-summa	20 000	59 000	17 000	12 700	18 000	9 900



Kuva 6. Materiaalin 6 materiaalipitoisuusanalyysien tulokset tässä tutkimuksessa, vuonna 2018 tehdyssä tutkimuksessa sekä tässä tutkimuksessa tehdyssä neljän laboratorion vertailukokeessa.

Bulk-emissiomittausten PAH(16)-yhdisteiden ja metyyliinaftaleenien pitoisuudet

Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen rakennusmateriaalien bulk-emissiomittausten PAH(16)-yhdistepitoisuudet.

Taulukko 1. Tutkittujen rakennusmateriaalien bulk-emissiomittausten PAH-yhdistepitoisuudet. PAH(16)-yhdisteet lihavoitu.

Materiaali / tila	1, pikisively, tila 1.1	2, valuasfaltti, tila 3.1.1	5, bitumiliima, tila 4.2.1	3, tervapaperi, tila 3.2.1	4, korkkilevy, tila 4.1.1	6, tervapahvi, tila 5.1
PAH-yhdiste	Massamaiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$]			Huokoiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$]		
Naftaleeni	842	168,57	4,91	0,37	30	0,18
2-Metyyliinaftaleeni	111	16,61	1,84	1,58	8,4	0,07
1-Metyyliinaftaleeni	56	6,49	1,1	1,44	5,9	0,07
Asenaftyleeni	4,8	<0,09	0,33	0,29	0,26	0,59
Asenaftteeni	45	6,11	4,36	1,51	27	0,07
Fluoreeni	25	2,63	0,8	7,19	5,9	0,57
Fenantreeni	27	2,22	3,99	1,14	30	11
Antraseeni	4,5	0,29	0,52	0,78	4,6	0,90
Fluoranteeni	0,98	<0,09	0,2	0,44	2,7	0,74
Pyreeni	0,51	<0,09	<0,15	<0,15	1,4	<0,01
Bentso[a]antraseeni	<0,04	<0,09	<0,15	<0,15	<0,07	<0,01
Kryseeni	<0,04	<0,09	<0,15	<0,15	<0,07	<0,01
Bentso[b]fluoranteeni	<0,04	<0,09	<0,15	<0,15	<0,07	<0,01
Bentso[k]fluoranteeni	<0,04	<0,09	<0,15	<0,15	<0,07	<0,01
Bentso[a]pyreeni	<0,04	<0,09	<0,15	<0,15	<0,07	<0,01
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,16	<0,34	<0,15	<0,07	<0,13	<0,03
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,16	<0,34	<0,15	<0,07	<0,13	<0,03
Bentso[ghi]peryleeni	<0,16	<0,34	<0,15	<0,07	<0,13	<0,03
PAH(16)-summa	950	180	15	12	102	14

Koekammiossa tehtyjen emissiomittausten PAH(16)-yhdistepitoisuudet

Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen rakennusmateriaalien koekammiossa tehtyjen emissiomittausten PAH(16)-yhdistepitoisuudet.

Taulukko 1. Tutkittujen rakennusmateriaalien koekammiossa tehtyjen emissiomittausten PAH(16)-yhdistepitoisuudet.

Materiaali/tila	1, pikisively tila 1.1	2, valuasfaltti tila 3.1.1	5, bitumiliima tila 4.2.1	3, tervapaperi tila 3.2.1	4, korkkilevy* tila 4.1.1	4, korkkilevy** tila 4.1.1	6, tervapahvi tila 5.1
PAH-yhdiste	Massamaiset materiaalit [µg/m ² h]			Huokoiset materiaalit [µg/m ² h]			
Naftaleeni	530	33	<0,13	0,039	19	4,4	0,09
2-Metyyli-naftaleeni	110	3,3	<0,13	0,021	4,8	1,7	0,03
1-Metyyli-naftaleeni	53	1,2	<0,13	0,030	3,2	1,1	0,03
Asenaftyleeni	4,3	<0,13	<0,13	0,027	0,23	< 0,16	0,20
Asenafteneeni	59	1	0,44	<0,01	31	9,3	0,05
Fluoreeni	33	0,63	<0,13	0,044	5,2	2,7	0,33
Fenantreeni	34	0,73	1,3	0,66	32	16	5,70
Antraseeni	6,3	<0,13	0,2	0,098	3,4	2,1	1,40
Fluoranteeni	1,3	<0,13	<0,13	0,099	1,7	1,6	0,68
Pyreeni	0,66	<0,13	<0,13	0,058	0,81	0,78	0,57
Bentso[a]antraseeni	<0,16	<0,13	<0,13	<0,013	<0,16	<0,16	<0,013
Kryseeni	<0,16	<0,13	<0,13	<0,013	<0,16	<0,16	<0,013
Bentso[b]fluoranteeni	<0,16	<0,13	<0,13	<0,013	<0,16	<0,16	<0,013
Bentso[k]fluoranteeni	<0,16	<0,13	<0,13	<0,013	<0,16	<0,16	<0,013
Bentso[a]pyreeni	<0,16	<0,13	<0,13	<0,013	<0,16	<0,16	<0,013
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,31	<0,13	<0,13	<0,025	<0,16	<0,16	<0,025
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,31	<0,13	<0,13	<0,025	<0,16	<0,16	<0,025
Bentso[ghi]peryleeni	<0,31	<0,13	<0,13	<0,025	<0,16	<0,16	<0,025
PAH(16)-summa	668,6	35,4	1,9	1,0	93,3	36,9	9,0

* tulos korkkieristeen pinnalta poistettu rappaus/tasoite, ** tulos korkkieristeen pinnalla olleen rappauksen kanssa.

Tutkittujen tilojen sisäilmanäytteen PAH(16)-yhdisteiden tulokset

Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty tutkittujen tilojen eri olosuhteissa tehtyjen sisäilman PAH(16)-yhdistemittausten tulokset.

Taulukko 1. Massamaisia rakennusmateriaaleja sisältävien tutkittujen tilojen sisäilman PAH(16)-yhdistepitoisuudet eri olosuhteissa.

Materiaali / tila	Massamaiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]								
	Materiaali 1, pikisiveily, tila 1.1			Materiaali 2, valuasfaltti, tila 3.1.1			Materiaali 5, bitumiliima, tila 4.2.1		
	Norm.	Alip.	Rak.	Norm.	Alip.	Rak.	Norm.	Alip.	Rak.
Naftaleeni	0,23	0,23	22	0,39	1,7	410	0,22	0,94	0,53
2-Metyyli-naftaleeni	0,09	0,08	2,5	0,1	0,32	34	0,04	0,22	0,11
1-Metyyli-naftaleeni	0,05	0,04	1,2	0,06	0,16	15	0,03	0,11	0,06
Asenaftyleeni	<0,02	<0,03	<0,08	<0,02	<0,03	<0,02	<0,03	<0,05	<0,01
Asenaftteeni	<0,02	<0,03	0,56	<0,02	<0,03	6,7	0,13	0,78	0,05
Fluoreeni	<0,02	<0,03	0,2	<0,02	<0,03	2,2	<0,03	0,13	0,02
Fenantreeni	0,09	0,06	0,16	0,03	0,03	2,1	0,09	0,59	0,12
Antraseeni	<0,02	<0,03	<0,04	<0,02	<0,03	0,25	<0,03	<0,05	<0,01
Fluoranteeni	<0,02	<0,03	<0,04	<0,02	<0,03	0,64	<0,03	<0,05	0,02
Pyreeni	<0,02	<0,03	<0,04	<0,02	<0,03	0,49	<0,03	<0,05	<0,01
Bentso[a]antraseeni	<0,02	<0,03	<0,04	<0,02	<0,03	0,25	<0,03	<0,05	<0,01
Kryseeni	<0,02	<0,03	<0,04	<0,02	<0,03	0,26	<0,03	<0,05	<0,01
Bentso[b]fluoranteeni	<0,02	<0,03	<0,23	<0,02	<0,03	0,2	<0,03	<0,05	<0,01
Bentso[k]fluoranteeni	<0,02	<0,03	<0,04	<0,02	<0,03	0,18	<0,03	<0,05	<0,01
Bentso[a]pyreeni	<0,02	<0,03	<0,31	<0,02	<0,03	0,21	<0,03	<0,05	<0,01
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,04	<0,05	<0,08	<0,10	<0,10	0,15	<0,10	<0,20	<0,05
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,04	<0,05	<0,08	<0,10	<0,10	<0,09	<0,10	<0,20	<0,05
Bentso[ghi]peryleeni	<0,04	<0,05	<0,08	<0,10	<0,10	0,12	<0,10	<0,20	<0,05
PAH(16)-summa	0,32	0,29	22,9	0,42	1,73	423,8	0,44	2,4	0,74

Taulukko 2. Huokoisia rakennusmateriaaleja sisältäneiden tutkittujen tilojen sisäilman PAH(16)-yhdistepitoisuudet eri olosuhteissa.

Materiaali / tila	Huokoiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]								
	Materiaali 3, tervapaperi, tila 3.2.1			Materiaali 4, korkkilevy, tila 4.1.1			Materiaali 6, tervapahvi, tila 5.1		
	Norm.	Alip.	Rak.	Norm.	Alip.*	Rak.	Norm.	Alip.	Rak.
Naftaleeni	2,1	1,4	0,42	0,94		4,8	0,04	0,04	0,170
2-Metyyli-naftaleeni	0,37	0,24	0,08	0,12		0,84	<0,02	<0,02	0,048
1-Metyyli-naftaleeni	0,18	0,12	0,05	0,06		0,51	<0,02	<0,02	0,029
Asenaftyleeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		0,16	<0,02	<0,02	<0,024
Asenafteeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		2	<0,02	<0,02	0,067
Fluoreeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		0,57	<0,02	0,03	0,170
Fenantreeni	<0,03	<0,03	0,03	0,12		7,3	0,27	1,40	7,100
Antraseeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		1,8	<0,02	<0,02	0,067
Fluoranteeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		9,5	0,02	0,09	0,850
Pyreeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		6,3	<0,02	<0,02	0,210
Bentso[a]antraseeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		4,7	<0,02	<0,02	<0,024
Kryseeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		7,4	<0,02	<0,02	<0,024
Bentso[b]fluoranteeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		4,3	<0,02	<0,02	<0,096
Bentso[k]fluoranteeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		3,9	<0,02	<0,02	<0,096
Bentso[a]pyreeni	<0,03	<0,03	<0,02	<0,05		4,2	<0,02	<0,02	<0,096
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,03	<0,03	<0,07	<0,18		3	<0,04	<0,05	<0,096
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,03	<0,03	<0,07	<0,18		0,96	<0,04	<0,05	<0,096
Bentso[ghi]peryleeni	<0,03	<0,03	<0,07	<0,18		2,5	<0,04	<0,05	<0,096
PAH(16)-summa	2,1	1,4	0,45	1,06	0	63,39	0,3	1,56	8,63

* ei mittausta

Sisäilmanäytteiden PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset

Taulukoissa 1–5 on esitetty sisäilman rinnakkaisnäytteiden PAH(16)-yhdisteiden tulokset ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) niistä kohteista, joista on otettu useampia ilmanäytteitä eri tiloista.

Taulukko 1. Kohteen 1 sisäilman PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

Materiaali / kohde	Materiaali 1, pikisively (Kohde 1)			
	Massamaiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			
Tila	tila 1.1 (varasto)		tila 1.3 (huonetila)	
Näytteenottopäivä	9.11.2021	9.11.2021	9.11.2021	9.11.2021
Näytteenottoaika	12:41 - 14:38	17:19 - 19:00	10:57 - 12:40	17:18 - 19:00
Näytteenotto-olosuhteet	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti
	Norm.	Alip.	Norm.	Alip.
Naftaleeni	0,23	0,23	0,39	0,40
2-Metyylinaftaleeni	0,09	0,08	0,14	0,10
1-Metyylinaftaleeni	0,05	0,04	0,07	0,05
Asenaftyleeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Asenaftteeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Fluoreeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Fenantreeni	0,09	0,06	0,03	<0,02
Antraseeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Fluoranteeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Pyreeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Bentso[a]antraseeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Kryseeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Bentso[b]fluoranteeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Bentso[k]fluoranteeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Bentso[a]pyreeni	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,04	<0,05	<0,05	<0,05
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,04	<0,05	<0,05	<0,05
Bentso[ghi]peryleeni	<0,04	<0,05	<0,05	<0,05
PAH(16)-summa	0,32	0,29	0,42	0,40

Taulukko 2. Kohteen 4 sisäilman PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

Materiaali / kohde	Materiaali 5, bitumiliima (Kohde 4)			
	Massamaiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			
Tila	4.2.1 (toimisto)		4.2.2 (neuvottelutila)	
Näytteenottopäivä	19.1.2022	19.1.2022	19.1.2022	19.1.2022
Näytteenottoaika	09:45 - 11:25	13:00 - 13:50	09:15 - 11:00	12:26 - 14:09
Näytteenotto-olosuhteet	ks. raportti	ks. raportti	ks. alaviite*	ks. alaviite*
	Norm.	Alip.	Norm.	Alip.
Naftaleeni	0,22	0,94	1,2	1,1
2-Metyyli-naftaleeni	0,04	0,22	0,12	0,12
1-Metyyli-naftaleeni	0,03	0,11	0,05	0,05
Asenaftyleeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Asenafteeni	0,13	0,78	0,07	0,10
Fluoreeni	<0,03	0,13	<0,02	<0,02
Fenantreeni	0,09	0,59	0,17	0,18
Antraseeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Fluoranteeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Pyreeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Bentso[a]antraseeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Kryseeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Bentso[b]fluoranteeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Bentso[k]fluoranteeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Bentso[a]pyreeni	<0,03	<0,05	<0,02	<0,02
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,10	<0,20	<0,10	<0,10
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,10	<0,20	<0,10	<0,10
Bentso[ghi]peryleeni	<0,10	<0,20	<0,10	<0,10
PAH(16)-summa	0,44	2,44	1,44	1,38

* Tilaan 4.2.2 tehtiin sisäilmamittaus tilan "normaaliolosuhteissa" ja koneellisen tulo-poistoilmanvaihdon ollessa pois päältä. Normaalitylanteessa tilan olosuhteet olivat poikkeukselliset. Tila oli ilmanvaihdon toiminnan takia noin 30 Pa alipainen, erillinen tulo-poistoilmakone viereisessä tilassa oli täydellä teholla, eikä se ollut säädettävissä. Tilan 4.2.2 lämpötila oli 20,5 °C ja ilmentkosteus 32,9 %RH, parkettipinnan lämpötila oli 17,5...20,5 °C. Tilassa havaittiin "normaalitylanteessa" PAH-yhdisteisiin viittaavia lehaduksia ikkunaseinällä lämmityspattereiden vieressä. Alipaineistuksen tulokset kuvaavat tilannetta, jossa tilan ilmanvaihto on laitettu kokonaan pois päältä, tila oli tällöin noin 3–12 Pa alipainen rakenteen yli. Myös ilmanvaihdon ollessa pois päältä oli paikoin havaittavissa hetkellisiä PAH-yhdisteisiin viittaavia lehaduksia.

Taulukko 3. Kohteen 2 sisäilman PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

Materiaali / kohde	Materiaali 2, tervapaperi (Kohde 2)			
	Huokoiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			
Tila	2.1 (huone)		2.2 (huone)	
Näytteenottopäivä	9.11.2021	10.11.2021	9.11.2021	
Näytteenottoaika	14:20 - 15:30	09:44 - 11:17	14:24 - 15:30	
Näytteenotto-olosuhteet	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti
	Norm.	Alip.	Norm.	Alip. (ei mitattu)
Naftaleeni	0,09	0,24	0,09	-
2-Metyyli-naftaleeni	<0,04	0,06	<0,04	-
1-Metyyli-naftaleeni	<0,04	<0,05	<0,04	-
Asenaftyleeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Asenafteeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Fluoreeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Fenantreeni	<0,04	0,06	<0,04	-
Antraseeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Fluoranteeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Pyreeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Bentso[a]antraseeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Kryseeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Bentso[b]fluoranteeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Bentso[k]fluoranteeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Bentso[a]pyreeni	<0,04	<0,03	<0,04	-
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,07	<0,05	<0,07	-
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,07	<0,05	<0,07	-
Bentso[ghi]peryleeni	<0,07	<0,05	<0,07	-
PAH(16)-summa	0,86	0,89	0,86	-

Taulukko 4. Kohteen 5 sisäilman PAH(16)-yhdisteiden rinnakkaisanalyysien tulokset.

Materiaali / kohde	Materiaali 6, tervapahvi (Kohde 5)					
	Huokoiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
Tila	tila 5.1 (huone alak.)		tila 5.4 (komero)		tila 5.5 (huone yläk.)	
Näytteenottopäivä	12.4.2022	28.4.2022	12.4.2022	28.4.2022	12.4.2022	28.4.2022
Näytteenottoaika	09:39 - 11:47	14:27 - 16:10	10:15 - 12:00	12:20 - 14:07	10:19 - 12:12	10:25 - 12:05
Näytteenotto-olosuhteet	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti	ks. raportti
	Norm.	Alip.	Norm.	Alip.	Norm.	Alip.
Naftaleeni	0,04	0,04	0,03	0,03	0,06	0,05
2-Metyyli-naftaleeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
1-Metyyli-naftaleeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Asenaftyleeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Asenaftteeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Fluoreeni	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	0,04
Fenantreeni	0,27	1,4	0,65	1,0	0,63	1,5
Antraseeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Fluoranteeni	0,02	0,09	0,10	0,14	0,04	0,10
Pyreeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Bentso[a]antraseeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Kryseeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Bentso[b]fluoranteeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Bentso[k]fluoranteeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Bentso[a]pyreeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,04	<0,05	<0,05	<0,05	<0,04	<0,05
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,04	<0,05	<0,05	<0,05	<0,04	<0,05
Bentso[ghi]peryleeni	<0,04	<0,05	<0,05	<0,05	<0,04	<0,05
PAH(16)-summa	0,33	1,56	0,78	1,17	0,73	1,69

Taulukko 5. Kohteen 5 sisäilman PAH(16)-yhdisteiden tulokset tiloista 5.1, 5.4 ja 5.5. Kyseessä uusintamittaus hellesäällä, normaalitilanne (ei alipaineistusta). Huomaa taulukossa 4 esitetystä mittaustilanteesta poikkeavat olosuhteet. Muista mittauksista poiketen näytteet otettiin sekä adsorptiokeräimellä (XAD) että hiukkaskeräimellä (PFTE).

Materiaali / kohde	Materiaali 6, tervapahvi (Kohde 5)					
	Huokoiset materiaalit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
Tila	tila 5.1(huone alak.)		tila 5.4 (komero)		tila 5.5 (huone yläk.)	
Näytteenottopäivä	22.7.2022	22.7.2022	22.7.2022	22.7.2022	22.7.2022	22.7.2022
Näytteenottoaika	13:00 - 14:45	9:15 - 14:45	13:05 - 14:53	9:25 - 14:53	13:02 - 14:49	9:20 - 14:49
Näytteenotto-olosuhteet	ks. alaviite*	ks. alaviite*	ks. alaviite*	ks. alaviite*	ks. alaviite*	ks. alaviite*
Keräin	XAD	PFTE	XAD	PFTE	XAD	PFTE
Naftaleeni	0,17	<0,0038	0,14	<0,0039	0,26	<0,0039
2-Metyyli-naftaleeni	0,048	<0,0038	0,056	<0,0039	0,075	<0,0039
1-Metyyli-naftaleeni	0,029	<0,0038	0,028	<0,0039	0,047	<0,0039
Asenaftyleeni	<0,024	<0,0038	<0,024	<0,0039	<0,024	<0,0039
Asenafteeni	0,067	<0,0038	0,074	<0,0039	0,11	<0,0039
Fluoreeni	0,17	<0,0038	0,20	<0,0039	0,21	<0,0039
Fenantreeni	7,1	0,091	12	0,20	4,7	0,056
Antraseeni	0,067	<0,0038	0,15	<0,0039	0,028	<0,0039
Fluoranteeni	0,85	0,020	1,7	0,12	0,40	0,023
Pyreeni	0,21	0,0048	0,31	0,023	0,075	0,0047
Bentso[a]antraseeni	<0,024	<0,0038	<0,024	<0,0039	<0,024	<0,0039
Kryseeni	<0,024	<0,0038	<0,024	<0,0039	<0,024	<0,0039
Bentso[b]fluoranteeni	<0,096	<0,016	<0,093	<0,016	<0,094	<0,016
Bentso[k]fluoranteeni	<0,096	<0,016	<0,093	<0,016	<0,094	<0,016
Bentso[a]pyreeni	<0,096	<0,016	<0,093	<0,016	<0,094	<0,016
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni	<0,096	<0,016	<0,093	<0,016	<0,094	<0,016
Dibentso[a,h]antraseeni	<0,096	<0,016	<0,093	<0,016	<0,094	<0,016
Bentso[ghi]peryleeni	<0,096	<0,016	<0,093	<0,016	<0,094	<0,016
PAH(16)-summa	8,634	0,1158	14,574	0,343	5,783	0,0837

* Tutkimuspäivän aikana vallitsivat seuraavat olosuhteet: ulkoilman lämpötila oli välillä 22,5–24,9 °C ja suhteellinen kosteus oli välillä 60–73 RH%, tuulen suunta oli pääosin etelästä/ lounaasta, tuulen puuskanopeus oli välillä 4,5–8,2 (kohtalaista/navakkaa) ollen voimakkaimmillaan noin klo 15 (Kaisaniemen havaintoasema). Tuulen suunta kääntyi kohti itää päivän aikana. Paikallisesti ulkolämpötilan todettiin nousseen enimmillään noin 26–27 °C:een. Rakennus oli tutkimusten aikaan tyhjiällä, eikä siellä ollut lämmitystä, eikä merkittävää kosteuslisää. Rakennuksen sisälämpötilan ja kosteusolosuhteiden arvioidaan mukailleen tutkimusten aikaan pitkälti ulkoilman olosuhteita.

Näytteenotto PFTE-keräimellä: Hiukkasiin sitoutuneet PAH-yhdisteet kerätään virtausnopeudella 1–20 l/min PFTE-suodattimelle ($\phi 37$ mm). Näytteeseen kerätty ilmamäärä oli 655–660 dm³, aggressiivinen näytteenotto, jossa pintoja pyyhittiin puhtaalla harjalla päivän aikana muutaman kerran. Pintojen pyyhkiminen aloitettiin samassa tilassa XAD-keräimellä tehdyn kaasumaisten yhdisteiden näytteenoton jälkeen. Määritysraja 800 l näytteelle on noin 0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Analyysiä varten yhdisteet uutetaan keräimestä liuottimella ja määritetään käyttäen GC/MS-laitteistoa. Menetelmän kokonaismittausepävarmuus on yhdistekohtainen 20–32 %. Tulokset on ilmoitettu yksikössä mikrogrammaa kuutiometriä kohden ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ja ne on laskettu laboratoriolle ilmoitetun ilmamäärän tai keräysajan avulla.