

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

PÄÄSTÖLÄHTEET, MITTAUSMENETELMÄT, PITOISUUSTASOT JA
TERVEYSVAIKUTUKSET

**Kaisa Wallenius
Hanna Hovi
Selma Mahiout
Jouko Remes
Sirpa Rautiala
Pirjo Jokela
Katri Leino
Tuula Liukkonen**

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

PÄÄSTÖLÄHTEET, MITTAUSMENETELMÄT, PITOISUUSTASOT JA TERVEYSVAIKUTUKSET

Kaisa Wallenius, Hanna Hovi, Selma Mahiout, Jouko Remes, Sirpa Rautiala,
Pirjo Jokela, Katri Leino ja Tuula Liukkonen

Työterveyslaitos

Helsinki

Työterveyslaitos

PL 40

00032 Työterveyslaitos

www.ttl.fi

© 2021 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Julkaisu on toteutettu Kansallisen sisäilma ja terveys -ohjelman rahoituksella.

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-261-957-0 (pdf)

TIIVISTELMÄ

Katsauksessa tarkastellaan toimistotyypisissä työympäristöissä esiintyvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden yleisimpiä päästölähteitä, pitoisuustasoja, haitallisia terveysvaikutuksia ja mittausmenetelmiä. Tarkastelun pääpaino on haihtuvissa VOC-yhdisteissä (volatile organic compounds), mutta suppeasti tarkastellaan myös erittäin haihtuvia WVOC-yhdisteitä (very volatile organic compounds) ja puolihaihtuvia SVOC-yhdisteitä (semivolatile organic compounds). Sisäilman pitoisuustasojen tarkastelu pohjautuu Työterveyslaitoksen VOC- ja formaldehydimittausaineistoihin vuosilta 2010–2019.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden esiintymisen sekä pitoisuuksien paikallinen ja ajallinen vaihtelu sisäilmassa on suurta, ja vaihteluun vaikuttavat sekä rakennuksen sisäiset että ulkoiset lähteet. Rakennuksen sisäisiä päästölähteitä ovat mm. erilaiset rakennus- ja sisustusmateriaalit, laitteet ja tekniset järjestelmät, tilojen käyttäjät ja käyttäjien toiminta sekä erilaiset kuluttajatuotteet ja siivousaineet. Ulkoilman merkittävin päästölähde on liikenne. Hyvinkin erilaiset materiaalit voivat vapauttaa samoja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, eikä siten sisäilmasta mitatun yhdisteen lähdettä voida päätellä mittauksen perusteella.

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä voidaan määrittää sisäilmasta keräävillä menetelmillä ja jatkuvatoimisilla mittalaitteilla. Keräävillä menetelmillä otetut näytteet analysoidaan laboratoriossa ja ainoastaan niillä saatuja tuloksia voidaan arvioida suhteessa erilaisiin ohje- ja raja-arvoihin. Jatkuvatoimisilla mittalaitteilla saadaan suuntaa antavaa tietoa sisäilman epäpuhtauspitoisuuksista ja pitoisuuksissa tapahtuvista muutoksista. Jatkuvatoimisia mittalaitteita ei voida tällä hetkellä käyttää yksinään sisäilman kemiallisen laadun arviointiin. Niitä ei tule myöskään käyttää terveysvaikutusten arviointiin.

Tässä katsauksessa käsitellyt VOC-tulokset on analysoitu käyttäen ISO 16000-6 -standardiin pohjautuvaa analyysimenetelmää. Näytteet on kerätty pääosin aktiivisesti pumpulla, mutta joukossa on myös jonkin verran passiivisesti diffuusion avulla kerättyjä näytteitä. Formaldehydinäytteet on analysoitu ISO 16000-3 -standardiin perustuvalla menetelmällä ja näytteitä on kerätty sekä aktiivisesti että passiivisesti.

Vuosina 2010–2019 kerättyjen aineistojemme perusteella VOC-yhdisteiden ja WVOC-yhdisteisiin kuuluvan formaldehydin tavanomaiset pitoisuudet ovat toimistotyypisten ympäristöjen sisäilmassa varsin pieniä, huomattavasti terveysperusteisten EU-LCI ja RW-arvojen sekä asumisterveysasetuksen toimenpiderajojen alapuolella. Siten haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin liittyvät haitalliset terveysvaikutukset ovat nykytiedon valossa epätoennäköisiä toimistotyypisissä työympäristöissä. VOC-yhdisteiden TVOC-kokonaispitoisuuden (total volatile organic compounds) mediaani oli $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja P90-arvo $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Yksittäisten VOC-yhdisteiden mediaanit olivat pääosin alle määritysrajan ja P90-arvot

pienimmillään alle määritysrajan ja suurimmillaan $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Formaldehydipitoisuuden mediaani oli $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja P90-arvo $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kymmenen vuoden tarkastelujaksolla yhdisteiden esiintyvyydessä näkyy sekä laskevia että nousevia trendejä. Esiintyvyyden lisäksi tarkasteltiin keskimääräisiä pitoisuuksia määritysrajan ylittävissä näytteissä. Keskimääräisissä pitoisuuksissa ei ole tapahtunut suuria muutoksia ja pitoisuudet ovat olleet koko kymmenvuotisen tarkastelujakson ajan hyvin matalia. Alifaattisten ja aromaattisten hiilivetyjen esiintyvyys on vähentynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana, mikä liittyy todennäköisesti rakennusmateriaalipäästöjen vähenemiseen, siivousmenetelmien ja käytettyjen siivousaineiden muutokseen sekä vähäpäästöisten polttoaineiden yleistymiseen. Aldehydien, fenolin, happojen, alkoholi- ja fenolieettereiden, estereiden ja piiyhdisteiden esiintyvyys on kasvanut, mikä liittyy todennäköisesti pääosin rakennus- ja sisustusmateriaalien sekä hygienia- ja siivousaineiden muutoksiin. Näiden yhdisteiden esiintyvyyden kasvu saattaa osin selittyä myös analytiikan kehittymisellä, mihin viittaa keskimääräisten pitoisuuksien aleneminen määritysrajan ylittävissä näytteissä. Alkoholisten osalta on havaittavissa siirtymää 2-etyyli-1-heksanolista C_9 -alkoholeihin, mikä selittyy PVC-muovimattojen pehmittimien muuttumisella.

JOHDANTO

Sisäilmassa, huonepölyssä ja pinnoille kiinnittyneinä esiintyy valtava kirjo erilaisia kaasumaisia ja hiukkasmaisia orgaanisia yhdisteitä, jotka ovat peräisin hyvin moninaisista rakennuksen sisäisistä ja ulkoisista lähteistä. Suuri osa sisäympäristöjen orgaanisista yhdisteistä on haihtuvia, mikä tarkoittaa, että ne höyrystyvät helposti huonelämpötilassa ja esiintyvät merkittävässä määrin kaasumaisessa muodossa. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden molekyylikoko vaihtelee yhden hiilen yhdisteistä yli kahdenkymmenen hiilen yhdisteisiin.

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä vapautuu sisäilmaan mm. rakennus- ja sisustusmateriaaleista, tilan käyttäjistä ja käyttäjien toiminnoista sekä sisätiloissa käytettävistä puhdistuskemikaaleista, kuluttajatuotteista ja erilaisista laitteista. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ulkoisia lähteitä ovat mm. moottoriajoneuvojen ja teollisuuden päästöt.

Tässä katsauksessa tarkastellaan toimistotyypissä työympäristöissä esiintyvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden yleisimpiä päästölähteitä, pitoisuustasoja, terveysvaikutuksia ja mittausmenetelmiä. Sisäilman pitoisuustasojen tarkastelu pohjautuu Työterveyslaitoksen mittausaineistoihin vuosilta 2010–2019. Tarkempaan terveysvaikutusten tarkasteluun on valittu yhdisteitä ja yhdisteryhmiä niiden esiintymisen yleisyyden, pitoisuustasoissa tapahtuneiden muutostrendien sekä asiantuntijoille usein esitettyjen kysymysten perusteella.

Työterveyslaitoksen asiantuntijat laativat katsauksen vuonna 2020 Kansallisen sisäilma ja terveys -ohjelman rahoituksella osana Terveet tilat 2028 -ohjelmaa. Katsaus liittyy Kansallinen sisäilma- ja terveys ohjelman osa-alueeseen 2: rakennusten ongelmatilanteet. Katsauksen tuloksia on tarkoitus hyödyntää mm. rakennusten olosuhteiden ja niiden terveydellisen merkityksen arvioimiseen liittyvien ohjeiden päivityksissä.

Katsauksen kirjoittajat kiittävät hyödyllisistä kommentteista luonnosversiota kommentoineita Työterveyslaitoksen asiantuntijoita: Sanna Lappalainen, Markku Sainio, Tiina Santonen, Piia Taxell, Katja Tähtinen ja Aki Vuokko.

SISÄLLYS

Johdanto	5
1 Mitä haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat?	8
1.1 Määritelmät ja luokittelu	8
1.2 Yhdisteryhmien esittely	10
1.2.1 Alifaattiset hiilivedyt	10
1.2.2 Aromaattiset hiilivedyt	10
1.2.3 Terpeenit	10
1.2.4 Alkoholit	11
1.2.5 Fenolit	11
1.2.6 Alkoholi- ja fenolieetterit	11
1.2.7 Aldehydit	11
1.2.8 Ketonit	12
1.2.9 Orgaaniset hapot	12
1.2.10 Esterit	12
1.2.11 Orgaaniset piiyhdisteet	12
1.2.12 Halogenoidut hiilivedyt	13
1.2.13 Ftalaatit	13
1.3 Lähteet ja pitoisuuksiin vaikuttavat tekijät sisäympäristöissä	13
2 Näytteenotto ja analysointi	21
2.1 Ilmanäytteet	21
2.1.1 Keräävät menetelmät	21
2.1.2 Jatkuvat toimiset mittalaitteet	23
2.2 Materiaalipäästöt	24
2.3 Menetelmän valinta	26
3 Ohje-, raja- ja viitearvot	27
3.1 Asumisterveysasetuksen toimenpiderajat	28

3.2	HTP-arvot.....	29
3.3	EU-LCI-arvot.....	30
3.4	RW I ja II -arvot.....	31
3.5	Työterveyslaitoksen viitearvot.....	31
4	Toimistotyypisten ympäristöjen sisäilmasta mitatut pitoisuudet.....	33
4.1	Aineistot.....	33
4.1.1	VOC-aineisto.....	33
4.1.2	Formaldehydiaineisto.....	34
4.2	Yleisimmät yhdisteet sisäilmassa.....	34
4.3	Muutostrendit.....	43
5	Haitalliset terveysvaikutukset.....	54
5.1	Haitalliset terveysvaikutukset toimistotyypissä työympäristöissä.....	54
5.2	Haitalliset terveysvaikutukset suurissa pitoisuuksissa.....	57
5.2.1	Alifaattiset hiilivedyt.....	57
5.2.2	Aromaattiset hiilivedyt.....	57
5.2.3	Terpeenit.....	60
5.2.4	Alkoholit.....	60
5.2.5	Fenolit.....	61
5.2.6	Alkoholi- ja fenolieetterit.....	62
5.2.7	Aldehydit.....	62
5.2.8	Ketonit.....	63
5.2.9	Hapot.....	64
5.2.10	Esterit.....	64
5.2.11	Orgaaniset piiyhdisteet.....	65
5.2.12	Kloorianisolit.....	66
6	Johtopäätökset.....	67
7	Lähdeluettelo.....	70

1 MITÄ HAIHTUVAT ORGAANISET YHDISTEET OVAT?

1.1 Määritelmät ja luokittelu

Haihtuvalle orgaaniselle yhdisteelle ei ole yhtä yleisesti hyväksyttyä täsmällistä määritelmää. Eri yhteyksissä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä voidaan käyttää erilaisia määritelmiä ja luokitteluja, jotka perustuvat mm. yhdisteiden kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin, analysoinnissa käytettyihin mittausmenetelmiin tai terveys- ja ympäristöhaittoihin. Laajasti ymmärrettynä haihtuvalla orgaanisella yhdisteellä voidaan tarkoittaa mitä tahansa hiiltä sisältävää yhdistettä, joka voi esiintyä kaasumaisessa muodossa tavanomaisissa sisä- tai ulkoympäristön lämpötiloissa. Hiilen oksideja, kuten hiilimonoksidia ja hiilidioksidia, ei kuitenkaan yleensä lasketa kuuluviksi orgaanisiin yhdisteisiin.

Taulukossa 1 on esitelty Euroopan unionin, Maailman terveysjärjestö WHO:n ja kansainvälisen standardointiorganisaation ISO:n käyttämiä määritelmiä haihtuville orgaanisille yhdisteille. Määritelmät perustuvat höyrynpaineeseen, kiehumispisteeseen ja standardoituun mittausmenetelmään.

WHO ja ISO jakavat haihtuvat orgaaniset yhdisteet kolmeen haihtuvuuden mukaiseen luokkaan: 1) erittäin haihtuvat orgaaniset yhdisteet VVOC (very volatile organic compounds), 2) haihtuvat orgaaniset yhdisteet VOC (volatile organic compounds) ja 3) puolihaihtuvat orgaaniset yhdisteet SVOC (semi volatile organic compounds). WHO:n ja ISO-standardin määritelmien mukaiset VVOC-, VOC-, SVOC-alueet vastaavat pääsääntöisesti hyvin toisiaan, mutta erojakin on etenkin alueiden rajapinnoilla. Tässä katsauksessa käytetään ISO-standardin mukaista VVOC/VOC/SVOC-määrittelyä, joka on WHO:n määritelmää tarkkarajaisempi.

Orgaanisista yhdisteistä, jotka esiintyvät tavanomaisissa sisä- ja ulkoympäristön lämpötiloissa ainoastaan kiinteässä olomuodossa, käytetään nimitystä POM (particulate organic matter). Raja puolihaihtuvien SVOC-yhdisteiden ja hiukkasmaisten POM-yhdisteiden välillä ei kuitenkaan ole tarkkarajainen kuten eivät muidenkaan haihtuvuuteen perustuvien luokkien rajat.

Tässä katsauksessa tarkastellaan VOC-yhdisteitä ja suppeasti sisäympäristöissä esiintyviä VVOC- ja SVOC-alueiden orgaanisia yhdisteitä. Kirjallisuuden mukaan monien VVOC-yhdisteiden ja SVOC-yhdisteiden analytiikasta ja esiintymisestä sisäympäristöissä tarvitaan lisää tutkimustietoa (Fromme ym. 2015; Lucattini ym. 2018; Salthammer 2016; Salthammer 2020; Wei ym. 2015; Wei ym. 2018). Monet etenkin SVOC-alueen orgaaniset

yhdisteet ovat elinympäristössämme kokonaan uusia tulokkaita tai vanhojen haitallisten yhdisteiden tilalle kehitettyjä korvaavia kemikaaleja.

Taulukko 1. Erilaisia määritelmiä haihtuville orgaanisille yhdisteille

Organi- saatio	Määritelmä	Viite
EU	Haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä tarkoitetaan orgaanista yhdistettä sekä kreosootien osaa, jonka höyrynpaine 293,15 K:n lämpötilassa on vähintään 0,01 kPa tai jolla on vastaava haihtuvuus tietyissä käyttöolosuhteissa.	Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU
EU	Haihtuvalla orgaanisella yhdisteellä tarkoitetaan orgaanista yhdistettä, jonka alkukiehumispiste normaali-ilmanpaineessa 101,3 kPa mitattuna on enintään 250°C.	Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/42/EY
WHO	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet jaetaan kolmeen ryhmään kiehumispisteen perusteella: 1) VVOC-yhdisteet kiehumispiste 0 ... 50–100 °C 2) VOC-yhdisteet kiehumispiste 50–100 ... 240–260 °C 3) SVOC-yhdisteet kiehumispiste 240–260 ... 380–400 °C	WHO 1989
ISO	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet jaetaan kolmeen ryhmään standardimenetelmässä kuvatussa kromatografisessa analyysissä toteutuvan eluotumisjärjestyksen perusteella: 1) VOC-yhdisteet eluotuvat ennen n-heksaania 2) VOC-yhdisteet eluotuvat n-heksaanin ja n-heksadekaanin välisellä alueella 3) SVOC-yhdisteet eluotuvat n-heksadekaanin jälkeen	Standardi ISO 16000-6:2011

Yhdisteiden haihtuvuuteen liittyvän VVOC/VOC/SVOC/POM-jaottelun lisäksi orgaaniset yhdisteet voidaan luokitella kemiallisen rakenteen ja toiminnallisten ryhmien perusteella mm. alifaattisiin hiilivetyihin, aromaattisiin hiilivetyihin, terpeeneihin, alkoholeihin, alkoholi- ja fenolieettereihin, aldehydeihin, happoihin, ketoneihin ja estereihin. Orgaanisissa yhdisteissä voi olla monia eri toiminnallisia rakenneosia, jolloin yhdiste voidaan luokitella

kuuluvaksi useaan eri yhdisteryhmään. Yhdisteryhmien ominaisuuksia ja esimerkkejä niihin kuuluvista yhdisteistä ja päästölähteistä on esitelty luvussa 1.2.

1.2 Yhdisteryhmien esittely

1.2.1 Alifaattiset hiilivedyt

Alifaattiset yhdisteet ovat hiilivetyjä, jotka eivät sisällä bentseenirengasta tai vastaavaa rakenneosaa. Ne voivat olla suoraketjuisia, haaroittuneita tai rengasrakenteisia eli sykliisiä. Alifaattiset hiilivedyt voivat sisältää yksinkertaisia, kaksois- tai kolmoissidoksia, joiden perusteella ne jaotellaan alkaaneihin, alkeeneihin ja alkyyneihin. Alifaattisia hiilivetyjä on sisäilmassa tavallisesti yksittäisinä yhdisteinä ja pieninä pitoisuuksina. Niiden lähteitä voivat olla esimerkiksi monet rakennusmateriaalit, puhdistusaineet ja kosmeettiset tuotteet.

1.2.2 Aromaattiset hiilivedyt

Aromaattiset yhdisteet ovat hiilivetyjä, jotka sisältävät bentseenirenkaan eli tasomaisen kuuden hiiliatomin muodostaman rengasrakenteen, jossa hiili-hiilidoksissa olevat elektronit ovat jakautuneet tasaisesti eli delokalisoituneet koko renkaan alueelle. Bentseeni, ksyleenit ja tolueeni ovat tavallisia sisäilmassa ja niiden yleisin lähde on liikenne. Tolueenia ja ksyleenejä käytetään myös liuottimina, mutta niiden käyttö on viime aikoina vähentynyt.

PAH-yhdisteet eli polysykliset aromaattiset hiilivedyt muodostuvat kahdesta tai useammasta bentseenirenkaasta. Useimmat PAH-yhdisteet kuuluvat puolihaihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin (SVOC) tai hiukkasmaisiin orgaanisiin yhdisteisiin (POM). Naftaleeni on PAH-ryhmän haihtuvin yhdiste ja sillä, kuten muillakin kaasumaisessa muodossa esiintyvillä PAH-yhdisteillä, on tunnusomainen haju. Sisäilman PAH-yhdisteet voivat olla peräisin kivihiilitervaa sisältävistä rakennusmateriaaleista (esim. vanhat kosteuseristeet) ja epätäydellisestä palamisesta kuten liikenteestä, puun- ja kynttilöiden poltosta ja ruoanlaitosta.

1.2.3 Terpeenit

Terpeenien rakenneosa on isopreeni, jonka polymeerejä terpeenit ovat. Ne ovat laaja hiilivetyryhmä, jotka ovat yleensä peräisin kasveista. Terpeenejä haihtuu mm. hedelmistä, puista ja yrteistä. Limoneeni on sisäilmassa useimmiten peräisin ihmisen toiminnasta, kuten hajusteista ja elintarvikkeista. Myös puumateriaaleista voi haihtua jonkin verran limoneenia. α -Pineeni on havupuille tyypillinen terpeeni ja sitä on yleisesti sisäilmassa. Puumateriaalista haihtuu terpeenien lisäksi myös muita yhdisteitä.

1.2.4 Alkoholit

Alkoholit ovat orgaanisia yhdisteitä, joissa hydroksyyli-ryhmä (-OH) on kiinnittynyt tyydyttyneeseen hiiliatomiin. Moniarvoisissa alkoholeissa on useampia hydroksyyli-ryhmiä, ei kuitenkaan koskaan samaan hiiliatomiin kiinnittyneenä. Alkoholeja haihtuu sisäilmaan monenlaisista materiaaleista ja tuotteista. Helposti haihtuvat alkoholit kuten etanoli, 2-metyyli-2-propanoli ja 2-propanoli ovat useimmiten peräisin pesu- ja puhdistusaineista tai pintojen ja ihon desinfiointiin tarkoitetuista tuotteista. 1-Butanolia voi haihtua sisäilmaan mm. vesiohenteisista liimoista ja PVC-materiaaleista. 2-Etyyli-1-heksanoli (2-EH) on toinen sisäilmassa tavallinen alkoholi, jonka lähteet ovat useimmiten vesiohenteinen liima tai PVC-materiaalit. Alkoholit voivat olla peräisin myös PVC:n pehmittimien (esim. ftalaattien) hajoamisesta, jota tapahtuu etenkin alkalisen kosteuden vaikutuksesta. Propyleeniglykoli eli 1,2-propaanidioli on sisäilmassa yleinen kaksiarvoinen alkoholi. Sitä haihtuu monista erilaisista rakennusmateriaaleista, pesu- ja puhdistusaineista, kosmetiikasta ja elintarvikkeista.

1.2.5 Fenolit

Fenolit ovat orgaanisia yhdisteitä, joissa yksi tai useampi hydroksyyli-ryhmä on kiinnittynyt suoraan bentseenirenkaaseen. Fenolilla on oma tunnusomainen hajunsa, jota moni kuvailee kemikaalimaiseksi. Fenolia voi haihtua erilaisista muovimateriaaleista, luonnonkorista ja uusista sähkölaitteista.

1.2.6 Alkoholi- ja fenolieetterit

Eetterit ovat orgaanisia yhdisteitä, joissa on happisilta (-O-) kahden tyydyttyneen hiilen välissä. Alkoholi- ja fenolieetterit, joita myös glykolieettereiksi kutsutaan, sisältävät sekä alkoholien että eetterien toiminnalliset rakenneosat. Alkoholi- ja fenolieetterit ovat yleisiä sisäilmassa, jolloin tavanomaisia lähteitä ovat erilaiset rakennusmateriaalit sekä pesu- ja puhdistusaineet.

1.2.7 Aldehydit

Aldehydien toiminnallinen rakenneosa on terminaalinen karbonyyli-ryhmä (-CHO). Aldehydejä haihtuu sisäilmaan usein luonnonmateriaaleista. Lisäksi joitain aldehydejä voidaan käyttää hajusteissa ja elintarvikkeiden aromiaineina. Formaldehydi (metanaali) ja asetaldehydi (etanaali) ovat erittäin haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). Formaldehydiä haihtuu sisäilmaan erilaisista palamisprosesseista kuten tupakoinnista, puunpoltosta ja kynttilöistä, erityisesti puupohjaisista rakennus- ja sisustusmateriaaleista, kalusteista, tekstiileistä ja kosmetiikasta. Asetaldehydin lähteitä ovat palaminen, erityisesti puupohjaiset rakennusmateriaalit, erilaiset kosmeettiset tuotteet ja ihminen itse. Heksanaali on sisäilmassa usein peräisin puumateriaaleista, mutta sitä voidaan käyttää myös hajusteissa tai

aromiaineena. Nonanaali eli pelargonialdehydi on yleinen sisäilmassa. Sen lähteitä voivat olla erilaiset luonnonmateriaalit, hajusteet ja aromiaineet. Bentsaldehydi on yksinkertaisin aromaattinen aldehydi, jossa karbonyyliryhmä on kiinnittynyt bentseenirenkaaseen. Se on mantelille tuoksuva, yleisesti aromiaineena ja hajusteena käytetty yhdiste, jota käytetään myös monenlaisten kemiallisten yhdisteiden lähtöaineena.

1.2.8 Ketonit

Ketonit ovat orgaanisia yhdisteitä, joissa karbonyyliryhmä on hiiliketjun keskellä. Sisäilman yleisin ketoni on asetoni, joka kuuluu VVOC-alueelle. Sitä haihtuu erilaisista rakennusmateriaaleista, ihmisen toiminnasta ja jopa ihmisestä itsestään. Muita ketoneja voi olla sisäilmassa pieniä määriä.

1.2.9 Orgaaniset hapot

Useimmat orgaaniset hapot ovat karboksyylihappoja, joissa toiminnallinen ryhmä on karboksyyli-ryhmä (-COOH). Orgaanisia happoja haihtuu sisäilmaan luonnonmateriaaleista kuten puusta ja pellavaöljystä. Erittäin haihtuvista yhdisteistä (VOC) etikkahappo kuuluu tähän ryhmään. Sitä on sisäilmassa yleisesti ja sitä voi rakennusmateriaalien lisäksi tulla sisäilmaan myös pesu- ja puhdistusaineista sekä elintarvikkeista. Muita sisäilmassa yleisiä orgaanisia happoja ovat propaanihappo ja heksaanihappo.

1.2.10 Esterit

Kun karboksyylihapo ja alkoholi reagoivat, muodostuu esteriä ja vettä. Esterit ovat hapon ja alkoholin kondensaatiotuotteita, jossa hydroksyyli-ryhmä on korvautunut O-alkyyli-ryhmällä. Sisäilmassa on yleisesti estereitä ja osa niistä voi olla peräisin ihmisten toiminnasta tai elintarvikkeista. 2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaanidiolimonoisobutyraatti (Texanol) on yleisesti vesiohenteisissa maaleissa käytettävä yhdiste, jonka pitoisuus on korkeimmillaan heti maalaamisen jälkeen. 2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaanidiolidi-isobutyraatti (TXIB) on mm. PVC-materiaalien pehmittimenä käytettävä kemikaali. Sitä voi haihtua erilaisista PVC:stä valmistetuista tuotteista, mutta rakennusmateriaaleissa se on nykyisin melko harvinainen.

1.2.11 Orgaaniset piiyhdisteet

Orgaaniset piiyhdisteet ovat pii-happi-rungosta muodostuneita suoria, haaroittuneita tai syklisiä polymeerejä, joissa piiatomeihin on liittynyt hiilivetyryhmiä. Piiyhdisteet ovat yleisiä sisäilmassa. Niitä käytetään erilaisissa pesu- ja puhdistusaineissa, tekstiilien käsittelyaineissa, kosmetiikassa ja tiivistysmassoissa. Dekametyylisyklopentasiloksaani on yksi yleisimpiä sisäilmasta määritettäviä piiyhdisteitä.

1.2.12 Halogenoidut hiilivedyt

Halogenoidut hiilivedyt ovat teollisesti valmistettuja hiilivetyjä, joissa yksi tai useampi vetatomi on korvattu kloorilla, fluorilla tai bromilla. Esimerkkejä VVOC- ja VOC-alueiden halogenoiduista hiilivedyistä ovat kylmäaineina kylmälaitteissa käytetyt fluorihilivedyt (HFC-yhdisteet) ja kloorifluorihilivedyt (CFC-yhdisteet), kuivapesukemikaalina käytetty tetrakloorieteeni ja esimerkiksi ilmanraikastimissa käytetty 1,4-diklooribentseeni. SVOC-alueen halogenoituihin hiilivetyihin kuuluu mm. joitakin aiemmin käytettyjä torjunta-aineita (mm. DDT, lindaani), palonestoaineita (mm. polybromatut bifenyylit), puunsuoja-aineita (kloorifenolit) sekä mm. lämmönsiirtonesteenä ja sähköeristeenä käytettyjä PCB-yhdisteitä (polyklooratut bifenyylit). Nykyisin useimpien halogenoitujen hiilivetyjen käyttö on Suomessa ja muualla Euroopassa lailla ja asetuksilla rajoitettua tai se on kielletty kokonaan aineiden myrkyllisyyden ja/tai ympäristövaikutusten vuoksi. Klooriansolit ovat haihtuvia yhdisteitä, joita muodostuu ennen vuotta 2000 puunsuoja-aineena käytettyjen kloorifenoleiden hajotessa. Niiden haju on tunnistettava jo hyvin pieninä pitoisuuksina.

1.2.13 Ftalaatit

Ftalaatit ovat aikaisemmin olleet yleisiä pehmittimiä PVC-materiaaleissa. Nykyisin PVC-pohjaisissa rakennusmateriaaleissa käytetään pehmittiminä mm. disyκλοheksaanihapon estereitä tai tereftalaatteja. Rakenteellisesti ftalaatit tai niitä korvaavat yhdisteet ovat estereitä.

1.3 Lähteet ja pitoisuuksiin vaikuttavat tekijät sisäympäristöissä

Sisäilmassa esiintyy yleensä laajempi kirjo erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä kuin ulkoilmassa ja lisäksi useimpien yhdisteiden pitoisuudet ovat sisäilmassa selvästi korkeampia kuin ulkoilmassa (Edwards ym. 2001; Geiss ym. 2011; Paciencia ym. 2016; Zhong ym. 2017). Sisäilman ja ulkoilman koostumuserot johtuvat mm. sisäympäristöissä suuremmasta ihmisen ja tämän toiminnan vaikutuksesta, suuremmasta pintamateriaalien määrästä ja kirjosta sekä vähäisemmästä valosta ja hapettavien yhdisteiden määrästä (Abbatt ja Wang 2020). Sisäympäristöissä VVOC-, VOC- ja SVOC-yhdisteitä esiintyy sekä kaasuettä partikkelifaaseissa ja pinnoille kiinnittyneinä, ja niiden väliset kemialliset reaktiot ovat monimutkaisia (Abbatt ja Wang 2020; Wei ym. 2018). Tavallisia sisäilmassa esiintyviä yhdisteryhmiä ovat alkaanit, terpeenit, aromaattiset yhdisteet ja aldehydit (Spinazze ym. 2020; Zhong ym. 2017).

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden esiintymisen sekä pitoisuuksien paikallinen ja ajallinen vaihtelu sisäympäristöissä on suurta, ja vaihteluun vaikuttavat sekä rakennuksen sisäiset että ulkoiset lähteet. Rakennuksen sisäisiä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden

lähteitä ovat mm. erilaiset rakennusmateriaalit, sisustusmateriaalit ja kalusteet, laitteet ja tekniset järjestelmät, tilojen käyttäjät ja käyttäjien toiminta, erilaiset kuluttajatuotteet sekä siivouksessa ja huollossa käytettävät kemikaalit (kuva 1, taulukko 2). Ulkoilman päästölähteitä ovat liikenne, teollisuus, pienpoltto ja kasvillisuus. Vuodenaika (Mandin ym. 2017; Paciencia ym. 2016) ja rakennuksen maantieteellinen sijainti (Baloch ym. 2020; Mandin ym. 2017; Sarigiannis ym. 2011; Spinazze ym. 2020) vaikuttavat yhdisteiden esiintymiseen ja pitoisuustasoihin.

Taulukossa 2 on esitetty esimerkkejä eri lähteistä ja materiaaleista vapautuvista yhdisteistä, joita voi yleisesti esiintyä pieninä pitoisuuksina sisäilmassa. Materiaalien emissiot voivat olla primäärisiä, sekundäärisiä tai tertiäärisiä. Primääriemissioilla tarkoitetaan materiaalien päästöjä, jotka vapautuvat materiaalista ensimmäisenä ja usein melko korkeina pitoisuuksina. Esimerkiksi liuottimien ja muiden apuaineiden haihtuminen maalin kuivumis- ja kalvonmuodostusprosessin aikana on primääriemissiota. Primääriemissiot vähenvät huomattavasti muutamassa kuukaudessa, ja ne ovat merkityksellisiä lähinnä rakennustyöntekijöiden työturvallisuuden näkökulmasta. Sekundääriemissioilla tarkoitetaan materiaalin pitkäaikaisia ominaispäästöjä, joiden muodostumiseen ei tarvita erillistä kemiallista reaktiota. Jos esimerkiksi 2-komponenttituotteen kaikki lähtöaineet eivät reagoi, voi niitä jäädä pitkäaikaiseksi päästölähteeksi. Sekundääriemissiot muodostavat merkittävän osan sisäilman kemiallisista tekijöistä. Tertiääriemissioita puolestaan syntyy, kun materiaalissa oleva yhdiste reagoi kemiallisesti esimerkiksi otsonin, veden tai valon vaikutuksesta synnyttäen haihtuvan yhdisteen. Otsoni on voimakas hapetin, joka voi reagoida monien rakennus- ja sisustusmateriaalien ja esimerkiksi ihon lipidien kanssa synnyttäen tertiääriemissioina esimerkiksi monia aldehydejä. PVC-materiaalien pehmitinaineina käytetyt ftalaatit voivat puolestaan tuottaa emäksisissä ja kosteissa olosuhteissa tertiääripäästöinä alkoholeja, kuten 2-etyyli-1-heksanolia ja ftalihappoa.

Eri materiaalien emissioprofiilit ovat erilaisia, mutta hyvinkin erilaiset materiaalit voivat vapauttaa samoja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, eikä siten sisäilmasta mitatun yhdisteen lähdettä voida päätellä mittauksen perusteella. Esimerkiksi formaldehydin lähteitä voivat olla erilaiset rakennusmateriaalit, kalusteet, tekstiilit, kosmetiikka, tupakointi, puun- ja kynttilöiden poltto, ruoanvalmistus sekä eri yhdisteiden hapettumisreaktiot.

Sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksiin vaikuttavat mm. emissiolähteiden laatu, laajuus ja sijainti, ihmisen toiminta, ilmanvaihdon tehokkuus, ilmavirtaukset, suhteellinen kosteus, lämpötila, yhdisteiden kiinnittyminen materiaaleihin, hapettumisprosessit sekä muut kemialliset ja mikrobiologiset prosessit (Abbatt ja Wang 2020; Edwards ym. 2001; Wei ym. 2018). Asunnoissa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kirjo on yleensä laajempi ja pitoisuustasot korkeampia kuin toimistoympäristöissä (Geiss ym. 2011; Paciencia ym. 2016). Tämä johtuu siitä, että asunnoissa ihmisen toiminnot ovat

moninaisempia ja ne myös tuottavat yleensä enemmän päästöjä kuin toimistoympäristöissä. Lisäksi asuntojen ilmanvaihto ei yleensä ole yhtä tehokas kuin toimistoissa.

Rakentamisen ja remontoinnin aikana haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet voivat olla korkeita, ja rakennuksen tai remontin valmistumisen jälkeisiin sisäilman pitoisuustasoihin vaikuttavat mm. materiaalivalinnat, rakennusmateriaalien kuljetus- ja varastointiolosuhteet, rakentamisprosessin aikaiset olosuhteet sekä rakennusvaiheiden järjestys (Gallon ym. 2020). Tyypillisesti rakentamisesta ja remontoinnista johtuva sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuustason nousu palautuu normaalille tasolle muutamassa kuukaudessa. Pitoisuustason normalisoitumiseen vaikuttaa ilmanvaihto ja sen tehostaminen sekä lämpö- ja kosteusolosuhteet (Valvira 2016, RT 07-11297). Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä suositellaan mitattavan sisäilmasta aikaisintaan puolen vuoden kuluttua rakentamisen tai remontin päättymisestä (Valvira 2016).



Kuva 1. Sisäympäristöissä esiintyvillä haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä on sekä rakennuksen sisäisiä että ulkoisia lähteitä.

Taulukko 2. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden emissiolähteitä ja esimerkkejä yhdisteistä, joita näistä lähteistä voi yleisesti vapautua pieninä pitoisuuksina. Taulukossa on esitetty esimerkkejä myös muista kuin orgaanisista kaasumaisista päästöistä (merkitty tähdellä *). Materiaalien hiukkaspäästöjä ei ole merkitty taulukkoon.

Emissiolähde	Esimerkkejä yhdisteistä
Rakennusmateriaalit PVC-materiaalit	TXIB C ₇ –C ₁₂ -alkoholit 2-Etyyli-1-heksanoli 1-Butanoli Alkyylibentsoaatit Alkyylibentseenit (C ₁₀ –C ₁₃) Fenoli Alkoholi- ja fenolieetterit
Linoleum	Orgaaniset hapot Aldehydit (huom. formaldehydi) Ketonit Alkoholit (C ₅ –C ₈) 2-Pentyyli-furaani
Tekstiilimatot	Kaprolaktaami 4-Fenyyli-syklohekseni (4-PCH) Siloksaanit Pohjamateriaalin päästöt
Korkki	Fenoliyhdisteet Terpeeniyhdisteet
Maalit, lakat (vesi-ohenteiset)	Texanol ja muita estereitä 1,2-Propanidioli Alkoholi- ja fenolieettereitä
Maalit, lakat (liuotin-ohenteiset)	Tolueeni Ksyleenit Hiilivetyseokset (liuotinbenssiini)
Liimat	2-Etyyli-1-heksanoli

Emissiolähde	Esimerkkejä yhdisteistä
	1-Butanoli Akrylaatit
Raakapuu	Terpeenit ja niiden johdannaiset (esim. α -pineeni, β -pineeni, 3-kareeni) Aldehydit Orgaaniset hapot
Kumi	Bentsotiatsoli Hiilivetyseokset Styreeni
Puupohjaiset tuotteet (esim. lastulevy, MDF, vaneri, CLT)	Terpeenit ja niiden johdannaiset (α -pineeni, β -pineeni, 3-kareeni) Aldehydit (huom. formaldehydi) Orgaaniset hapot Mahdollisesta pinnoitteesta aiheutuvat päästöt
Epoksinnoitteet	Bentsyylialkoholi Bentsaldehydi Alkoholi- ja fenolieetterit Hiilivetyseokset
Akrylipinnoitteet	Akrylaatit Alkoholi- ja fenolieetterit
Polyuretaanipinnoitteet	Ammoniakki* 1,2-Propanidioli Alkoholi- ja fenolieetterit Hiilivetyseokset
Tiivistemassat	Siloksaanit Etikkahappo Ammoniakki*
Mineraalivilla	Ammoniakki*

Emissiolähde		Esimerkkejä yhdisteistä
	Polystyreenieristeet	Styreeni 2-Metyyllibutaani
	Laastit, tasoitteet	Hiilivetyseokset Siloksaanit Ammoniikki*
	Kivihiilitervaa sisältävät vedeneristeet ja muut materiaalit	PAH-yhdisteet
Laitteet ja tekniset järjestelmät	Polttoaineet	Hiilivetyseokset
	Palamistuotteet	PAH-yhdisteet
	Voiteluaineet	Hiilivetyseokset
	Viemärikaasut	Rikkivety* Ammoniikki* Dimetyylidisulfidi
Kalusteet ja sisustusmateriaalit	Puumateriaalit	Ks. raakapuu ja puupohjaiset tuotteet
	Nahka, tekstiilit	Formaldehydi Ks. lianhyljintäpinnoitteet
	Maalit, liimat, lakat	Ks. maalit, lakat, liimat ja ohenteet
	Akustiikkamateriaalit	Pinnoitteen päästöt
	Lianhyljintäpinnoitteet	Siloksaanit
	Palonsuoja-aineet	Polybromatut difenyylietterit Organofosfaatit Ammoniikki*
	Huonekasvit	Terpeenit Aldehydit
	Puhdistusaineet, desinfiointiaineet	Etikkahappo

Emissiolähde		Esimerkkejä yhdisteistä	
Siivouksessa ja huollossa käytettävät kemikaalit		1,2-Propanidioli	
		2-Propanoli	
		Klooratut hiilivedyt	
		Etanoli	
	2-Metyyli-2-propanoli		
Lattiavahat		Alkoholi- ja fenolieetterit	
		2-Metyyli-1-pyrrolidinoni	
Lianhyljintäpinnoitteet		Siloksaanit	
Hajusteet		Terpeenit	
		Aldehydit	
Tilan käyttäjät	Aineenvaihduntatuotteet	Hiilidioksidi*	
		Isopreeni	
		Orgaaniset hapot	
		Ihon lipidien hapettumistuotteet	
		Suolikaasut	
	Kosmetiikka		Siloksaanit
	Hygieniatuotteet		1,2-Propanidioli
			2-Fenoksietanoli
			2,2,4,4,6,8,8-Heptametyylinonaani
			2,2,4,6,6-Pentametyyliheptaani
Hajusteet		Terpeenit	
		Aldehydit	
Tekstiilit ja tekstiilien käsittelyaineet		Siloksaanit	
		Formaldehydi	
Käyttäjien toiminnot	Elintarvikkeet ja ruoan valmistus	Aldehydit (rasvan kääriminen)	
		Asetaatit	
		Etanoli	
		Orgaaniset hapot, mm. etikkahappo	

Emissiolähde	Esimerkkejä yhdisteistä	
		Terpeenit, mm. limoneeni PAH-yhdisteet Typen oksidit*
Tupakansavu		Nikotiini 3-Etenyyliipyridiini Bentseeni ja muut aromaattiset hiilivedyt Formaldehydi PAH-yhdisteet Typen oksidit*
Kynttilänpoltto		Hajusteet PAH-yhdisteet
Ilmanraikastimet		1,4-Diklooribentseeni Etylibentseeni Terpeenit
Printterit, kopiokoneet, tietokoneet		Otsoni* Aldehydit (formaldehydi, asetaldehydi) Palonestoaineet
Toimistotarvikkeet (tus- sit, liimat ym.)		2-Metoksi-1-propanoli
Rakennuksen ulkoi- set lähteet	Liikenne: pakokaasut, polttoaineet	Bentseeni Tolueni Ksyleenit PAH-yhdisteet Typenoksidit*
	Pienpolton ja teollisuu- den päästöt	PAH-yhdisteet Erlaiset teollisuuden päästöt, mm. liuottimet, sel- luteollisuuden rikkiyhdisteet
	Fotokemialliset reaktiot	Otsoni*

2 NÄYTTEENOTTO JA ANALYSOINTI

2.1 Ilmanäytteet

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä voidaan määrittää sisäilmasta keräävillä menetelmillä ja jatkuvatoimisilla mittalaitteilla. Keräävillä menetelmillä otetut näytteet analysoidaan laboratoriossa, kun taas jatkuvatoimisten mittalaitteiden tulokset voidaan nähdä reaaliaikaisesti esim. tietokoneelta tai älylaitteelta.

2.1.1 Keräävät menetelmät

Sisäilman haihtuvia orgaanisia yhdisteitä voidaan kerätä ja analysoida eri menetelmillä, joista sisäilmaselvityksissä yleisimmin käytetyt on esitetty taulukossa 3. VOC-näytteenotossa käytetty adsorbentti ei pidätä tehokkaasti kaikkia sisäilmassa esiintyviä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Tämän vuoksi osalla yhdisteistä on omat näytteenotto- ja analysointimenetelmänsä, joilla saadaan luotettavampia tuloksia kuin VOC-yhdisteiden määrittämiseen tarkoitetuilla menetelmillä. Näytteet kerätään yleisimmin aktiivisesti pumpun avulla, jolloin näytteenottoa ja siihen vaikuttavia tekijöitä on helpompi arvioida. Joissain tilanteissa yhdisteiden pitoisuuksia halutaan selvittää pidemmällä aikavälillä ja näyte kerätään passiivisesti diffuusion avulla. Näytteenotto kestää tällöin pidempään: formaldehydillä vuorokauden tai yhden viikon ja VOC-yhdisteillä 2-4 viikkoa. Tulos on näytteenottavasta riippumatta mittausajan keskiarvo ja ihmisen toiminta mittauksen aikana saattaa vaikuttaa tuloksiin.

Taulukko 3. Yleisesti käytettyjä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden näytteenotto- ja analysointimenetelmiä.

Yhdiste	Näytteenotto	Analysointi	Viite
VOC			
- Aktiivinen	4–12 litran näyte pumpulla, Tenax TA- tai Tenax TA-Carbograph 5TD - adsorptio-putki	Kaasukromatografisesti käyttäen termodesorptiota ja massaselektiivistä ilmaisinta (TD-GC-MS)	ISO 16000-6
- Passiivinen	TD-diffuusiokeräin, Tenax TA-adsorbentti	Kaasukromatografisesti käyttäen termodesorptiota ja massaselektiivistä ilmaisinta (TD-GC-MS)	ISO 16000-6 ISO 16017-2
Formaldehydi ja muut aldehydit			
- Aktiivinen	60–100 litran näyte pumpulla, DNPH:lla päällystettyyn keräimeen	Nestekromatografisesti käyttäen liuotinuuttoa ja diodirividetektoria	ISO 16000-3
- Passiivinen	DNPH:lla päällystettyyn suodattimeen	Nestekromatografisesti käyttäen liuotinuuttoa ja diodirividetektoria	ISO 16000-3
PAH			
	Höyryinä esiintyvät PAH-yhdisteet: 100 litran näyte pumpulla, XAD-adsorbentti	Ultraääniavusteinen liuotinuutto-kaasukromatografia-massaspektrometria	Laboratorioiden sisäiset menetelmät
	Hiukkasiin sitoutuneet PAH-yhdisteet: vähintään 400 litran näyte pumpulla, teflonsuodatin		

ISO 16000-6 standardiin perustuvan menetelmän mukainen VOC-yhdisteiden analyysi on tällä hetkellä yleisin sisäilmasta tehtävä kemiallinen analyysi. VOC-analyysi on monipuolinen ja sillä saadaan selville laaja kirjo haihtuvia yhdisteitä. Näytteistä saadaan selville muiden muassa rakennusmateriaaleihin, ihmisen toimintaan ja liikenteeseen liittyviä yhdisteitä.

VOC-näytteistä määritetään haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus (TVOC) ja tunnistetaan ja määritetään vähintään 2/3 TVOC-alueen yhdisteistä sekä tärkeimmät yhdisteet ko. alueen ulkopuolelta. ISO 16000-6 -standardissa kokonaispitoisuus määritetään n-heksaanin ja n-heksadekaanin väliltä molemmat yhdisteet mukaan laskien. TVOC lasketaan tolueenin vasteen avulla eli tolueeniekvivalenttina.

TVOC-pitoisuuden lisäksi kiinnitetään huomiota yksittäisiin yhdisteisiin, niiden määrän ja laatuun. Yksittäiset yhdisteet tunnistetaan ja määritetään mahdollisuuksien mukaan puhdasten vertailuaineiden avulla. Jos yhdisteelle tai yhdisteryhmälle ei ole olemassa puhdasta vertailuainetta, määritetään yhdiste tolueeniekvivalenttina, jolloin sen pitoisuus on semikvantitatiivinen. Tulokseen saattaa silloin sisältyä huomattavan suuri pitoisuuden ja yhdisteen tunnistamisen epävarmuus.

Tolueeni ja muut VOC-yhdisteet eivät ole vasteeltaan samanlaisia ja siitä syystä tolueeniekvivalenttina määritetyt tulokset ovat semikvantitatiivisia eli niihin sisältyvää epävarmuutta ei kyetä määrittämään. Yhdisteen omalla vasteella määritettyä tulosta ei voi verrata tolueenin vasteen avulla määritettyyn tulokseen ja päinvastoin. Mikäli raja-arvo on määritetty yhdisteen omalla vasteella, ei tolueenin avulla määritettyä tulosta voi verrata siihen. Eri laboratorioiden saamia tuloksia verratessa tulee huomioida, että vain yhdisteen omalla vasteella määritettyjä tuloksia, joiden mittausepävarmuus on tiedossa, voidaan verrata toisiinsa ja silloinkin tulee mittausepävarmuus huomioida.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutta (TVOC) ei voi käyttää terveysvaikutusten arviointiin, koska kyse on yhdisteiden summasta, joka on määritetty vain tolueenin vasteen avulla. Joissain tilanteissa tunnistettujen yhdisteiden summa voi tästä syystä olla huomattavasti suurempi kuin TVOC.

Tuloksia arvioidessa ja niitä viitearvoihin verratessa tulee myös huomioida, millaisesta näytteestä on kyse. Vain ilmanäytteitä, jotka on otettu sisäilmasta hengityskorkeudelta, voidaan verrata ilmanäytteiden viitearvoihin. Näytteitä, jotka on otettu esim. huonekalun sisältä, lattiapinnoitteen alta tai nurkasta, voidaan hyödyntää päästölähteen tunnistamisessa, mutta tuloksia ei voi verrata ilmanäytteille tarkoitettuihin viitearvoihin tai toimenpiderajoihin.

2.1.2 Jatkuvat toimiset mittalaitteet

Keräävien menetelmien lisäksi haihtuvia orgaanisia yhdisteitä voidaan mitata myös jatkuvatoimisilla mittalaitteilla. Jatkuvat toimisten mittalaitteiden käyttö on yleistynyt viimeisen vuosikymmenen aikana sisäilman laadun arvioinnissa, mutta tutkimustietoa niiden luotettavuudesta löytyy vähän. Mittaustekniikka perustuu useimmiten yhdisteiden aiheuttamaan fotoionisaatioon (PID).

Mittalaitteiden valmistajilta ja laitetoimittajilta on saatavilla vähän tietoa laitteiden kalibroinnista, herkkyydestä ja valikoivuudesta (Alapieti ym. 2020). Tämän vuoksi tällä hetkellä ei tarkalleen tiedetä, mitä yhdisteitä esimerkiksi haihtuvien orgaanisten yhdisteiden mittaamiseen tarkoitettuja jatkuvatoimiset laitteet itse asiassa mittaavat (Alapieti ym. 2020). Tutkimustulosten perusteella mittalaitteiden anturit voivat havaita haihtuvien orgaanisten yhdisteiden lisäksi muita kaasuja kuten hiilidioksidia (Alhonnoro 2019), millä voi olla vaikutusta mittaustulokseen. Myös ilmankosteudella on havaittu olevan vaikutusta joidenkin antureiden toimintaan (Alhonnoro 2019). Em. tekijöillä voi olla vaikutusta myös siihen, miksi jatkuvatoimisilla mittalaitteilla ja keräävillä menetelmillä saadut epäpuhtauspitoisuudet eroavat usein toisistaan.

Jatkuvatoimisilla mittalaitteilla on mahdollista havaita epäpuhtauksien hetkellisiä pitoisuusvaihteluja ja tehdä pidemmän aikavälin seuranta, mikä ei ole mahdollista keräävillä menetelmillä (Vaittinen ym. 2018, Alapieti ym. 2020). Niillä ei kuitenkaan saada selville yksittäisten yhdisteiden pitoisuuksia, vaan tulos ilmoitetaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutena.

Jatkuvatoimiset mittalaitteet mittaavat eri asiaa kuin keräävät menetelmät ja antavat tulokset eri yksikössä kuin millä keräävien menetelmien tulokset esitetään. Tämän vuoksi jatkuvatoimisilla mittalaitteilla saatuja mittaustuloksia ei voi verrata suoraan keräävillä menetelmillä saatuihin tuloksiin tai asumisterveysasetuksen toimenpiderajoihin, jotka on annettu kerääville menetelmille. Jatkuvatoimisten mittalaitteiden mittausyksiköt vaihtelevat myös eri laitteiden välillä, joten eri laitteilla saatuja tuloksia ei myöskään voi verrata keskenään (Alapieti ym. 2020).

Jatkuvatoimisia mittalaitteita ei voida tällä hetkellä käyttää yksinään sisäilman kemiallisen laadun arviointiin. Niitä ei tule myöskään käyttää terveysvaikutusten arviointiin. Jatkuvatoimisilla mittalaitteilla saadaan suuntaa antavaa tietoa sisäilman epäpuhtauspitoisuuksista ja pitoisuuksissa tapahtuvista muutoksista.

2.2 Materiaalipäästöt

Rakennus- ja sisustusmateriaaleista vapautuvia päästöjä voidaan selvittää eri näytteenotomenetelmillä (taulukko 4). Yleisimmin näytteistä analysoidaan VOC-yhdisteiden, formaldehydin ja muiden aldehydien sekä ammoniakkin päästöjä (Leino ym. 2020). Analyysimenetelmät ovat samat kuin vastaaville ilmanäytteille.

Taulukko 4. Materiaalipäästöjen selvittämisessä käytetyt näytteenottomenetelmät.

Menetelmä	Näytteenotto	Viite
Bulk- eli kokonaisemissio mikrokammion menetelmällä	Materiaalinäyte 10x10 cm tai 1–2 rkl	Laboratorioiden sisäiset menetelmät
Pintaemissio FLEC- menetelmällä	Tutkittavalle pinnalle tiivistettävä FLEC-laitteisto, johon syötetään ilmaa esim. virtausnopeudella 100–300 ml/min	NT build 484 ISO 16000-10
Pintaemissio kammiomenetelmällä	Iso, ehjä materiaalinäyte	ISO 16000-9 EN 16516

Kullakin materiaalipäästöjen selvitysmenetelmällä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Sisäilmatutkimuksissa käytettävä materiaaliemissiotutkimusmenetelmä tulee aina valita tarkoin harkiten ja siten, että saaduilla tuloksilla on mahdollista vastata esitettyyn tutkimuskysymykseen.

Bulk-menetelmässä näyttemateriaali hienonnetaan tutkimusta varten, jolloin saadaan selville päästöt materiaalinäytteen kaikista osista, ei vain huoneilmaan päin olevilta pinnoilta (Leino ym. 2020). Tämä on hyödyllinen tieto silloin, jos päästölähteen epäillään olevan esimerkiksi lattiapinnoitteen alapinnalla ja päästöjen epäillään kulkeutuvan sisäilmaan muita reittejä kuin pinnoitteen pinnan läpi. Bulk-tulokset eivät kuitenkaan kerro sisäilman pitoisuuksista, eikä tuloksia voi verrata rakennusmateriaalien M-päästoluokituksen raja-arvoihin. Tuloksia ei myöskään voi käyttää terveyshaitan arviointiin. Bulk-menetelmällä saadut tulokset ovat luonteeltaan semikvantitatiivisia, joten saatuja tuloksia ei voida vertailla kuin karkeasti suuruusluokaltaan. Koska näytteenkäsittely ei ole vakioitua, ei eri laboratorioiden tuottamia kokonaisemissiotuloksia voida vertailla keskenään.

FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) -menetelmällä voidaan selvittää päästöjä materiaalien pinnoilta rakenteita rikkomatta. FLEC on hyvä menetelmä tilanteissa, joissa halutaan esimerkiksi seurata päästötasoja pidemmän aikaa tai korjaustoimenpiteiden vaikutusta päästötasoihin (Leino ym. 2020). Koska mittausolosuhteet eivät tyypillisesti ole vakioituneet ja mittausasetelma eroaa eurooppalaisesta mallihuoneesta (EN 16516) huomattavasti, ei FLEC-tuloksia tule käyttää sisäilman pitoisuuksien arviointiin. FLEC-tulokset eivät myöskään sovellu terveyshaitan arviointiin. FLEC-tuloksille ei ole olemassa viitearvoja, mutta suuntaa antavaa tietoa tulosten kokoluokasta saa esimerkiksi M-luokituksen luokitusrajoista (Rakennustietosäätiö 2020).

Kammiomenetelmää hyödynnetään pääasiassa käyttämättömien rakennusmateriaalien päästölukitustestauksessa (esim. M1-luokitus), mutta sitä voidaan soveltaa myös käytettyjen materiaalien testaamiseen (Leino ym. 2020). Koska kammiomenetelmä perustuu

eurooppalaiseen mallihuoneeseen (EN 16516) ja sen olosuhteet ovat vakioidut, voidaan menetelmällä saatujen tulosten avulla arvioida päästöjen vaikutusta sisäilman laatuun. Kammiotestaus tapahtuu aina laboratorio-olosuhteissa ja tarvittavien näytekappaleiden koko vaihtelee testattavan tuotetyypin ja käytetyn kammion tilavuuden mukaan (Leino ym. 2020). Käytettyjen materiaalien tuloksia voidaan tietyin varauksin verrata M-luokituksen raja-arvoihin.

2.3 Menetelmän valinta

ISO 16000-6 -standardiin perustuva menetelmä on monipuolinen ja sillä voi määrittää suuren osan sisäilman laadun kannalta merkittävistä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä. On kuitenkin syytä muistaa, että kaikkien yhdisteiden mittaaminen ei onnistu samalla menetelmällä. VOC-analyysin perusteella ei voida arvioida esimerkiksi formaldehydin pitoisuutta vaan siihen tarvitaan erillinen analyysi. Erittäin haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (VVOC) pienet aldehydit ja ketonit, kuten formaldehydi, asetaldehydi ja asetonit, voidaan määrittää ISO 16000-3 -standardiin perustuvalla menetelmällä. Puolihaihtuvista SVOC-yhdisteistä sisäilmasta mitataan useimmin PAH-yhdisteitä, joiden määrittäminen onnistuu paremmin juuri niille tarkoitetulla menetelmällä. Tieteellisissä tutkimusprojekteissa sisäilmasta on mitattu myös esimerkiksi ftalaatteja ja erilaisia palonestoaineita. Näytteenotto- ja analyysimenetelmää valittaessa ja tuloksia tulkittaessa tulee huomioida menetelmien rajoitukset ja kiinnittää huomiota esimerkiksi siihen, analysoidaanko pitoisuudet yhdistekohtaisella vai tolueenin vasteella.

3 OHJE-, RAJA- JA VIITEARVOT

Monille sisäilmassa esiintyville yhdisteille on olemassa erilaisia ohje-, raja- ja viitearvoja. Näitä ovat mm. asumisterveysasetuksen (545/2015) toimenpiderajat, Euroopan unionin EU-LCI-ohjearvot (LCI, Lowest Concentration of Interest; EU-LCI Working Group 2019a), saksalaiset RW I ja II -ohjearvot (RW, Richtwerte; Umweltbundesamt 2020), WHO:n sisäilman laatua koskevat suositukset (WHO 2010) sekä Työterveyslaitoksen viitearvot (Työterveyslaitos 2019). Lisäksi työperäisille altisteille on olemassa erilaisia työhygieenisiä raja-arvoja, kuten suomalaiset HTP-arvot (HTP, haitallisiksi tunnetut pitoisuudet). Asumisterveysasetuksen toimenpiderajat, HTP-arvot, EU-LCI-arvot, RW I ja II -arvot sekä Työterveyslaitoksen viitearvot on esitelty tarkemmin jäljempänä.

Osa em. arvoista on terveysperusteisia, jolloin arvot on asetettu niin, että ne suojaavat nykytiedon valossa haitallisilta terveysvaikutuksilta. Osa taas on viitearvoja, jotka antavat tietoa esimerkiksi altisteiden tavanomaisista pitoisuuksista, ja siten vertailukohdan mitaustuloksille. Sekä terveysperusteiset että muut arvot voivat olla joko ohjeellisia tai sitovia, jolloin arvon ylityksessä on ryhdyttävä jonkinlaisiin toimenpiteisiin.

Terveysperusteiset arvot laaditaan toksikologiseen ja epidemiologiseen asiantuntija-arviointiin perustuen hyödyntäen kaikkea saatavilla olevaa tieteellistä näyttöä. Monista yhdisteistä on saatavilla pääasiassa eläinkokeista korkeilla pitoisuuksilla saatua tietoa, mutta validoitujen tutkimusmenetelmien mukaisesti tehtyjen tutkimusten perusteella pystytään yleensä tunnistamaan pitoisuustasot, joiden alapuolella ei todennäköisesti esiinny haitallisia terveysvaikutuksia ihmisilläkään. Pelkästään eläinkoeyttöön perusutuvien arvojen johtamiseen käytetään suuria turvakertoimia, joiden avulla lisätään turvamarginaalia johdetun arvon ja haitallisiksi arvioitujen pitoisuustasojen välille.

Terveysperusteisia arvoja johdettaessa tunnistetaan yhdisteen kriittinen, eli matalimmalla pitoisuustasolla esiin tuleva haitallinen terveysvaikutus, jonka perusteella arvo asetetaan. Muita vaikutuksia saattaa seurata vasta altistumisesta huomattavasti korkeammille pitoisuustasoille. Kriittinen vaikutus saattaa esimerkiksi hengitystiealtistumisen seurauksena olla paikallinen vaikutus, kuten hengitystieärsytys. Monet yhdisteet aiheuttavat korkeilla annoksilla myös vakavampia vaikutuksia, esimerkiksi maksaan kohdistuvia haitallisia vaikutuksia. Nämä ovat harvoin kriittisiä, ja ne ovat yleensä olennaisia vasta huomattavan korkeilla pitoisuustasoilla tai lähinnä myrkytystapauksissa. Raja-arvon ylittyminen ei siis tarkoita, että kaikkia yhdisteen mahdollisia terveydelle haitallisia vaikutuksia esiintyisi välittömästi ko. pitoisuudelle altistuttaessa. Käytetyistä turvakertoimista johtuen lievät terveysperusteisten arvojen ylitykset eivät ylipäätään merkitse suoraan riskiä haitallisten terveysvaikutusten esiintymiselle, varsinkaan lyhytaikaisessa altistumisessa.

Terveysperusteiset arvot laaditaan tyypillisesti yhdistekohtaisesti. Yleisiä, yhteisvaikutukset huomioivia terveysperusteisia arvoja ei ole yleensä asetettu, sillä yhteisvaikutukset riippuvat seoksen sisältämistä yhdisteistä, niiden ominaisuuksista ja esiintyvistä pitoisuustasoista.

Eri asiantuntijatahojen määrittämät terveysperusteiset arvot voivat poiketa toisistaan. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi se, mihin tarkoitukseen ja mikä väestönosa huomioiden kyseinen arvo on johdettu. Vaikutusta voi olla myös sillä, minkä saatavilla olevien tutkimusten on katsottu antavan olennaisinta tietoa arvon käyttötarkoitukseen huomioiden. Siten eri arvojen perustana on voitu käyttää eri tutkimuksia. Arvon käyttötarkoituksesta, sen johtamiseen käytetystä tutkimusnäytöstä ja näytön epävarmuustekijöistä riippuen voidaan myös käyttää eri suuruisia turvakertoimia, jotka vaikuttavat lopullisen arvon suuruuteen.

Terveysperusteisten arvojen lisäksi sisäilmassa esiintyville kemiallisille yhdisteille on yleensä määritelty myös niille ominainen hajukynnys. Hajukynnys on pitoisuus, jonka ylittyttyä ihmiset pystyvät havaitsemaan ko. yhdisteen. Hajukynnysarvot ovat usein suuntaa-antavia, sillä hajun aistimisessa voi olla yksilöllisiä eroja. Eri yhdisteille määriteltyihin hajukynnyksiin vaikuttaa myös se, millaisen datan perusteella niitä on arvioitu. Monet haihtuvat orgaaniset yhdisteet voidaan haistaa jo matalina pitoisuuksina. On tärkeää huomioida, että hajukynnys ja terveydelle haitallinen pitoisuus eivät juuri koskaan ole samansuuruisia. Hajukynnyksen ollessa matala, sisäilmassa esiintyvän yhdisteen haju ei itsessään ilmaise haitallista terveysvaikutusta, vaikka haju saatetaan kokea epämiellyttävänä (Greenberg ym. 2013). Toisaalta jotkin yhdisteet voivat olla terveydelle haitallisia, vaikka niitä ei pysty haistamaan. Tämä pätee muihinkin altisteisiin kuin haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin.

Vaikka TVOC-kokonaispitoisuudelle on saatavilla viitearvoja, TVOC-pitoisuuden perusteella ei voida arvioida haitallisia terveysvaikutuksia. Mahdolliset haitalliset terveysvaikutukset riippuvat huomattavasti siitä, mistä yhdisteistä ja minkä suuruisista pitoisuuksista TVOC muodostuu.

3.1 Asumisterveysasetuksen toimenpiderajat

Asumisterveysasetusta (545/2015) "sovelletaan terveydensuojelulain (763/1994) nojalla tehtävään asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisten olosuhteiden valvontaan." Asetuksen "fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia altistumistekijöitä koskevia vaatimuksia ja niiden toimenpiderajoja sovelletaan tehtäessä terveydensuojelulain 27 tai 51 §:ssä tarkoitettuja päätöksiä ja määräyksiä." Tarkoitus on ehkäistä, selvittää, rajoittaa tai poistaa terveyshaittaa sen mukaan, mitä terveydensuojelulain (763/1994) 27 tai 51 §:ssä säädetään.

Asumisterveysasetuksessa on asetettu toimenpiderajoja tietyille kemiallisille tekijöille, kuten VOC-yhdisteille ja formaldehydille. Toimenpiderajalla tarkoitetaan "pitoisuutta,

mittaustulosta tai ominaisuutta, jolloin sen, kenen vastuulla haitta on, tulee ryhtyä terveys-
densuojelulain 27 §:n tai 51 §:n mukaisiin toimenpiteisiin terveyshaitan selvittämiseksi ja
tarvittaessa sen poistamiseksi tai rajoittamiseksi”. Asumisterveysasetuksen toimenpidera-
jat eivät pääsääntöisesti perustu tieteelliseen terveysvaaran arviointiin, eivätkä siksi so-
vellu terveysriskien arviointiin.

Asumisterveysasetuksen haihtuvien orgaanisten yhdisteiden toimenpiderajat on koottu
taulukkaan 5. Taulukossa on esitetty myös samojen yhdisteiden terveysperusteiset RW I
ja II -arvot, EU-LCI-arvot ja HTP_{8h}-arvot. Nämä arvot eivät ole keskenään suoraan vertailu-
kelpoisia, sillä formaldehydiä lukuun ottamatta asumisterveysasetuksen VOC-yhdisteiden
toimenpiderajat on annettu tolueenivasteella lasketuille pitoisuuksille, kun taas RW I ja II
-arvot, EU-LCI-arvot ja HTP-arvot on annettu yhdisteiden omilla vasteilla mitatuille pitoi-
suuksille. Arvojen vertailu antaa kuitenkin käsityksen suuruusluokasta.

3.2 HTP-arvot

HTP-arvot (STM 2020) ovat suomalaisia, lakisääteisiä työhygieenisia ohjearvoja, jotka on
vahvistettu työturvallisuuslain (738/2002) nojalla annetulla sosiaali- ja terveysministeriön
asetuksella (538/2018). HTP-arvot on tarkoitettu työnantajan huomioon otettavaksi työn
vaarojen selvittämisessä ja arvioinnissa sekä työpaikan ilman puhtautta, työntekijöiden
altistumista ja mittaustulosten merkitystä arvioitaessa. HTP-arvoja sovelletaan kemikaali-
turvallisuuden arviointiin tuotantoympäristöissä, joissa työprosesseissa vapautuu altis-
teita. HTP-arvoja asetetaan 8 tunnin (HTP_{8h}) ja 15 minuutin (HTP_{15min}) altistumisajalle sekä
tiettyjen välittömästi vaarallisten aineiden osalta myös hetkelliselle pitoisuudelle (katto-
arvo). HTP_{8h}-arvoja asetettaessa huomioidaan koko työuran aikainen altistuminen työ-
ajalla, eli lähtökohtaisesti 8 tuntia päivässä, viisi päivää viikossa koko työuran ajan.

HTP-arvot ovat pääasiassa terveysperusteisia ohjearvoja työntekijöiden hengitysilman
epäpuhtauksien pitoisuuksista. Niiden alapuolella hengitysteitse altistumisesta ei siis pää-
sääntöisesti olemassa olevan tiedon valossa aiheudu haittaa tai vaaraa työntekijöiden
turvallisuudelle tai terveydelle. HTP-arvoja asetettaessa ei kuitenkaan ole yleensä voitu
huomioida yksilöllisiä ominaisuuksia, kuten erilaisten sairauksien vaikutuksia. Joissakin ta-
pauksissa arvoa asetettaessa on voitu huomioida terveysperusteen lisäksi myös esimer-
kiksi mittausteknisiä tai sosioekonomisia näkökulmia. HTP-arvot valmistellaan sosiaali- ja
terveysministeriön kolmikantaisessa asiantuntijaryhmässä, Työturvallisuussäännöksiä val-
mistelevan neuvottelukunnan (TTN) HTP-jaostossa.

Kun lasketaan pitoisuuksien aikapainotettu keskiarvo 8 tunnin ajalta, HTP_{8h}-arvoa vastaa-
van pitoisuuden ei pitäisi ylittyä. HTP_{15min}-arvoa vastaavia pitoisuuksia ei pitäisi esiintyä
enempää kuin kerran tunnissa ja yhteensä enintään neljä kertaa 8 tunnin työvuoron

aikana. Altistumista hetkellisen kattoarvon ylittävälle pitoisuuksille ei pitäisi tapahtua ker-
taakaan työvuoron aikana.

HTP-arvojen lisäksi Suomessa on voimassa myös sitovia työhygieenisiä raja-arvoja, joita
ylittävälle pitoisuuksille ei saa altistua työpaikoilla lainkaan (VNa 1267/2019; VNa
789/2015; VNp 1154/1993; VNa 715/2001). Sitovia raja-arvoja on asetettu erityisesti syö-
pävaarallisille aineille.

3.3 EU-LCI-arvot

EU-LCI-arvot ovat rakennustuotteiden tuoteturvallisuusarviointeihin tarkoitettuja ohje-
arvoja, joita on saatavilla useille haihtuville orgaanisille yhdisteille. Ne ovat terveysperusteis-
ia vertailuarvoja, joiden avulla voidaan arvioida uusien rakennusmateriaalien päästöille
hengitysteitse altistumisesta aiheutuvia terveysriskejä.

EU-LCI-arvot ovat eurooppalaisten asiantuntijoiden laatimia (EU-LCI Working Group) ja
ne perustuvat epidemiologiseen ja toksikologiseen tutkimusnäyttöön. Arvioissa on huo-
mioitu sekä kansainvälisten että kansallisten tieteellisten riskinarviointikomiteoiden julkai-
semat riskinarvioinnit ja muut asiaankuuluvat tutkimukset. Arvot on asetettu niin, että ta-
voitteena on välttää koko väestön elinikäisestä altistumisesta johtuvat terveysriskit. EU-
LCI-arvot edustavat siis pitoisuustasoja, joiden ei nykytiedon valossa katsota todennäköi-
sesti aiheuttavan haitallisia terveysvaikutuksia pidemmälläkään aikavälillä.

EU-LCI -arvoja ei ole tarkoitettu käytettäväksi viitearvoina sisäilman laadun arvioimisessa,
vaan rakennusmateriaalien päästöjen arvioimiseen koeolosuhteissa. Ne on kuitenkin laa-
dittu samoja toksikologisen riskinarvioinnin periaatteita käyttäen kuin sisäilman laadun
arviointiin tarkoitettut arvot, joten niitä on käytetty tässä työssä suuntaa antavina vertai-
luarvoina toimistotyypissä työympäristöissä mitatuille haihtuvien orgaanisten yhdistei-
den pitoisuuksille. Tämä johtuu siitä, että Suomessa ei ole johdettu terveysperusteisia
ohje- tai raja-arvoja sisäilman laadun arvioimiseen. EU-LCI-arvot soveltuvat tähän tarkoi-
tukseen paremmin kuin esimerkiksi HTP-arvot, jotka on tarkoitettu työperäisestä altistu-
misesta johtuvilta terveysriskeiltä suojaamiseen erityisesti tuotantoympäristöissä, joiden
työprosesseissa vapautuu altisteita. HTP-arvot ovat erilaisen käyttötarkoituksensa vuoksi
tyypillisesti huomattavasti, usein kymmeniä tai jopa satoja kertoja EU-LCI sekä RW I ja II -
arvoja korkeampia. EU-LCI-arvot on laadittu sisäilmalle ja koko väestö sekä elinikäinen
altistuminen huomioiden. Tarvittaessa niiden johtamisessa on käytetty korkeita, jopa
100–1000-kertaisia turvakertoimia. EU-LCI-arvoja on lisäksi johdettu suuremmalle osalle
aineistossamme yleisesti esiintyneistä altisteista kuin esimerkiksi saksalaisia RW I ja II -
arvoja (ks. luku 3.4), joita on käytetty tässä työssä vertailuarvoina EU-LCI-arvojen rinnalla.

3.4 RW I ja II -arvot

RW I ja II -arvot ovat saksalaisia sisäilman laadun arviointiin tarkoitettuja ohjearvoja, jotka laatii kansallinen asiantuntijoista koostuva työryhmä (German Committee on Indoor Guidelines). EU-LCI- ja HTP-arvojen tavoin RW-arvot ovat terveysperusteisia. Kuten EU-LCI-arvot, myös RW I ja II-arvot on laadittu koko väestö huomioiden ja niitä käytetään Saksassa mm. kotien, toimistojen, koulujen ja muiden julkisten tilojen sisäilman laadun arviointiin.

RW II -arvot perustuvat toksikologiseen ja epidemiologiseen tietoon yhdisteiden pitoisuuksista, joilla voi esiintyä haitallisia terveysvaikutuksia. RW II -arvojen asettamisessa käytetään turvakertoimia, joiden avulla huomioidaan mahdolliset epävarmuustekijät. RW II -arvoille voidaan tarvittaessa määrittellä yhdisteen ominaisuuksista riippuen erilliset lyhyen (RW II K) ja pitkän (RW II L) altistumisen arvot. RW II -arvot edustavat pitoisuustasoja, joilla tai joiden ylittyessä voi aiheutua haitallisia terveysvaikutuksia esimerkiksi perussairauksien vuoksi herkille yksilöille, jos he altistuvat näille pitoisuustasoille pitkiä ajanjaksoja. Siten RW II -tason ylittymisen on katsottu Saksassa vaativan välittömiä toimenpiteitä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että välittömästi RW II -arvotason ylittyessä haitallisten terveysvaikutusten esiintyminen olisi todennäköistä, koska arvot sisältävät korkeita turvakertoimia.

RW I -arvot johdetaan RW II -arvoista käyttäen lisäturvakerrointa. Ne edustavat sisäilmassa esiintyvien yksittäisten yhdisteiden pitoisuuksia, jotka eivät nykytiedon valossa aiheuta haitallisia terveysvaikutuksia edes elinikäisen altistumisen seurauksena. Saksassa suositellaan varotoimenpiteenä, että toimenpiteisin ryhdytään myös, jos sisäilmasta mitataan yhdistettä RW I ja II -arvojen välissä olevalla pitoisuustasolla.

RW I ja II -arvoja on käytetty v. 2010–2019 mittausaineistomme vertailuarvoina EU-LCI-arvojen rinnalla, sillä RW-arvot tarkoitettu nimenomaan sisäilmassa esiintyvien yksittäisten yhdisteiden aiheuttamien terveysriskien arviointiin. Niitä on kuitenkin saatavilla pienemmälle joukolla aineistossa yleisimmin esiintyneistä yhdisteistä kuin EU-LCI-arvoja.

3.5 Työterveyslaitoksen viitearvot

Työterveyslaitos on laatinut viitearvoja toimistotyypissä työympäristöissä mitattaville haihtuville orgaanisille yhdisteille. Viitearvot eivät ole terveysperusteisia, vaan ne pohjautuvat Työterveyslaitoksen asiakaspalveluaineiston P90-arvoihin, jotka tarkistetaan ja päivitetään noin viiden vuoden välein. Siten niitä voidaan käyttää mittauksien vertailuun näihin nk. tavanomaisiin toimistotyypisten työympäristöjen pitoisuustasoihin.

Taulukko 5. Asumisterveysasetuksen haihtuvien orgaanisten yhdisteiden toimenpiderajat sekä samojen yhdisteiden terveysperusteiset RW I, II, EU-LCI-, ja 8 h HTP-arvot (HTP-arvolle aikapainotettu keskiarvo).

Yhdiste	Asumisterveys- asetuksen toimenpideraja ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RW I/II -arvot ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (asettamisvuosi)	EU-LCI-arvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (hyväksymis- vuosi)	8 h HTP-arvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (voimaan- astumisvuosi)
2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaalidioli diisobutyraatti (TXIB)	10 ¹	ei olemassa	1300 (v. 2018)	ei olemassa
2-etyyli-1-heksanoli (2-EH)	10 ¹	100/1000 (alustava; 300 (v. 2014) v. 2013)		5400 (v. 2014)
Naftaleeni	10 ¹ , ei saa esiintyä hajua	10/30 (alustava; v. 2013)	10 (v. 2015)	5000 (v. 2007)
Styreeni	40 ¹	30/300 (v. 1998)	250 (v. 2013)	86 000 (v. 1987)
Formaldehydi	50 (vuosikeskiarvo, ei saa ylittää) 100 (30 min keskiarvopitoisuus, ei saa ylittää)	100/ei olemassa (v. 2016)	100 (v. 2016)	370 ² (v. 2020)
Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus (TVOC)	400 ¹	ei olemassa	ei olemassa	ei olemassa
Yksittäinen haihtuva orgaaninen yhdiste (muut kuin yllä mainitut)	50 ¹	ei olemassa	ei olemassa	ei olemassa

¹ Tolueenivasteella laskettu tulos eli pitoisuus, joka on laskettu vertaamalla yhdisteen detektorivastetta tolueenin detektorivasteeseen. Arvoa ei voi verrata suoraan EU-LCI-, RW I/II tai HTP-arvoihin, jotka mitataan yhdisteen omalla vasteella.

² Sitova raja-arvo 11.7.2021 alkaen. Terveysturvallisuus sekä hautaus- ja balsamointialoilla sovelletaan ajalla 11.7.2021–11.7.2024 raja-arvoa 0,5 ppm (615 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

4 TOIMISTOTYYPPISTEN YMPÄRISTÖJEN SISÄILMASTA MITATUT PITOISUUDET

4.1 Aineistot

4.1.1 VOC-aineisto

Tarkastelimme katsausta varten Työterveyslaitoksen Työympäristölaboratoriossa analysoidun VOC-aineiston vuosilta 2010–2019. Aineisto koostuu toimistotyypisistä työtiloista kerätyistä sisäilman VOC-näytteistä (toimistot $n = 3872$, koulut $n = 3583$, päiväkodit $n = 727$, terveydenhuollon tilat $n = 1607$, kaikki yhteensä $n = 9789$), jotka Työterveyslaitoksen asiakkaat ovat toimittaneet Työympäristölaboratorioon analysoitaviksi vuosina 2010–2019. Alkuperäisestä aineistosta on poistettu asuntoista ja teollisista työympäristöistä kerätyt näytteet. Arviomme mukaan valtaosa näytteistä on kerätty kohteista, joissa on epäilty esiintyvän sisäilman laatuun liittyviä ongelmia.

Näytteet on kerätty joko Tenax TA- tai Tenax TA/Carbograph 5 TD -näytteenotto-putkiin Työterveyslaitoksen ohjeistuksen mukaisesti. Näytteet on analysoitu termodesorptio-kaasukromatografi-massaspektrometrilaitteistolla ISO 16000-6 -standardiin perustuvan menetelmän mukaisesti. Pitoisuudet on määritetty yhdisteiden omilla vasteilla C₉-alkoholiryhmää lukuun ottamatta.

Aineistosta tarkasteltiin koko kymmenen vuoden aineistossa vähintään 10 %:ssa näytteistä esiintyvien yhdisteiden geometrinen keskiarvopitoisuus, 50. persentiiliarvo eli mediaanipitoisuus, 90. persentiiliarvo (P90) sekä maksimipitoisuus. Lisäksi tarkasteltiin yhdisteiden esiintyvyydessä ja pitoisuuksissa tapahtuneita muutoksia vuosikohtaisen tarkastelun avulla. Geometrinen keskiarvo on laskettu määrittärajaa ylittävistä mittaustuloksista. Mediaani, P90-arvo ja maksimiarvo koskevat koko mittausaineistoa. Positiivisten lukujen geometrinen keskiarvo on keskiluku, joka kuvaa keskiarvoa logaritmisella asteikolla. Keskihajonta kertoo, miten kaukana havainnot keskimäärin ovat keskiarvosta. Mediaani ilmaisee arvon, jonka alapuolelle jakaumassa jää 50 % tapauksista, ja P90 arvon, jonka alapuolelle jää 90 % tapauksista.

Harvoin esiintyvien yhdisteiden (esiintyvyys alle 10 %) pitoisuusdataa ei tarkasteltu tässä katsauksessa muutamien yhdisteiden muutostrendiin liittyvää dataa lukuun ottamatta. Aineistosta ei myöskään analysoitu useiden haihtuvien orgaanisten yhdisteiden samanai-kaista esiintyvyyttä mittauskohteissa.

4.1.2 Formaldehydiaineisto

Tarkastelimme katsausta varten myös Työterveyslaitoksen Työympäristölaboratoriossa analysoidun formaldehydiaineiston vuosilta 2010–2019. Aineisto koostuu toimistotyypisistä työtiloista kerätystä sisäilman formaldehydinäytteistä (toimistot n = 521, koulut n = 938, päiväkodit n = 68, terveydenhuolto n = 184, kaikki yhteensä n = 1711), jotka asiakkaat ovat toimittaneet Työympäristölaboratorioon analysoitaviksi vuosina 2010–2019. Alkuperäisestä aineistosta on poistettu asunnoista ja teollisista työympäristöistä kerätyt näytteet. Arviomme mukaan valtaosa näytteistä on kerätty kohteista, joissa on epäilty esiintyvän sisäilman laatuun liittyviä ongelmia.

Näytteet on kerätty joko aktiivisesti tai diffuusion avulla DNPH-keräimiin Työterveyslaitoksen ohjeistuksen mukaisesti. Näytteet on analysoitu nestekromatografisesti ISO 16000-3 -standardiin perustuvan menetelmän mukaisesti.

Aineistosta tarkasteltiin geometrinen keskiarvopitoisuus määrittämissä ylittävistä mittaustuloksista sekä mediaani-, P90- ja maksimipitoisuudet koko mittausaineistosta.

4.2 Yleisimmät yhdisteet sisäilmassa

Työterveyslaitoksen toimistotyypisten työtilojen VOC-aineistossa vuosilta 2010–2019 havaittiin yhteensä noin 400 eri analyyttiä vähintään kerran. Analyyttillä tarkoitetaan yksittäistä yhdistettä tai yhdisteryhmää, jota ei voida käytetyllä menetelmällä erottaa erillisiksi yhdisteiksi. Analyyttejä, jotka esiintyivät yli 10 %:ssa näytteistä, oli yhteensä 42 ja ne on esitetty taulukossa 6.

Mediaani-, P90- ja maksimiarvot on ilmoitettu näille 42 yhdisteelle koko mittausaineistosta. Ainoastaan 12 yhdisteen mediaaniarvo ylitti määrittämissä ylittävistä mittaustuloksista. Nämä yleisimmät yhdisteet, jotka esiintyivät yli 50 %:ssa näytteistä, olivat bentseeni, ksyleenit (p, m), tolueni, α -pineeni, 1-butanoli, 2-etyyli-1-heksanoli, propyleeniglykoli, bentsaldehydi, dekanaali, heksanaali, nonanaali ja dekametyylisyklopentasiloksaani (taulukko 6). Näiden yhdisteiden tyypillisiä lähteitä ovat mm. ulkoilmasta kulkeutuvat moottoriajoneuvojen päästöt (aromaattiset yhdisteet), puupohjaiset ja muut rakennus- ja sisustusmateriaalit (α -pineeni, alkoholit), vesiohenteiset liimat ja PVC-materiaalit (alkoholit), pesu- ja puhdistusaineet, hajusteet, kosmetiikka (aldehydit, siloksaanit) ja elintarvikkeet (aldehydit).

Aineiston P90-arvo oli pienimmillään alle määrittämissä ylittävistä mittaustuloksista eli ne ku-
vattavat yhdisteen keskimääräistä pitoisuustasoa näytteissä, joissa kyseistä yhdistettä

esiintyy. Geometrinen keskiarvojen vaihteluväli taulukossa 6 esitetyille 42 yleisimmälle yhdisteelle oli 0,6–2,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mikä kertoo siitä, että silloinkin kun yhdisteitä esiintyy, keskimääräiset pitoisuudet ovat varsin pieniä ja ainoastaan hieman määritysrajan yläpuolella. Yhdisteiden määritysrajat ovat 0,3–1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Taulukon 6 laitimmaisissa sarakkeissa oikealla on ilmoitettu yhdisteen terveysperusteiset EU-LCI, RW I ja RW II -arvot, mikäli tällaiset on yhdisteelle laadittu. P90-arvot ja geometriset keskiarvot jäivät kaikkien yhdisteiden osalta huomattavasti EU-LCI, RW I ja RW II -arvojen alapuolelle. Joidenkin yhdisteiden maksimi-arvot ylittivät niiden EU-LCI-arvot, useiden yhdisteiden maksimi-arvot ylittivät RW I -arvot ja muutamat myös RW II -arvot. Maksimi-arvot on kuitenkin mitattu yksittäisistä kohteista, ja näidenkin yhdisteiden P90-arvot ja geometriset keskiarvot olivat huomattavasti maksimi-arvoa pienempiä. Yhdisteiden terveysvaikutuksia on tarkasteltu luvussa 5.

Taulukon 6 viimeisellä rivillä on esitetty aineiston näytteiden TVOC-kokonaispitoisuuden tunnusluvut. Geometrinen keskiarvo 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mediaani 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja P90-arvo 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ jäivät huomattavasti alle asumisterveysasetuksen toimenpiderajan, joka on 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Yksittäisestä kohteesta mitattu TVOC-pitoisuuden maksimi-arvo oli 4700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, joka vastaa tavanomaista tasoa teollisten työympäristöjen yleisilmassa. Työterveyslaitoksen vuosina 2005–2011 analysoimassa aineistossa teollisten työympäristöjen yleisilmasta kerättyjen näytteiden TVOC-pitoisuuden mediaani on ollut 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja P90-arvo 6580 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Työterveyslaitos 2012). TVOC-pitoisuudelle ei ole esitetty terveysperusteisia raja-arvoja.

Formaldehydin P90-arvo oli hieman pienempi kuin mitä se oli Työterveyslaitoksen edellisessä aineistotarkastelussa (Salonen ym. 2009) ja huomattavasti alle EU-LCI ja RW I -arvojen (taulukko 7). Myös maksimipitoisuus jäi näiden arvojen alle.

Taulukko 6. Yleisimmät VOC-yhdisteet (esiintyvyys ≥ 10 % näytteistä) toimistotyypisten työympäristöjen sisäilmassa vuosina 2010–2019 Työterveyslaitoksessa standardiin ISO 16000-6 perustuvalla menetelmällä analysoidun aineiston perusteella (toimistot $n = 3872$, koulut $n = 3583$, päiväkodit $n = 727$, terveydenhuolto $n = 1607$, kaikki yhteensä $n = 9789$). Pitoisuudet on määritetty yhdisteiden omilla vasteilla C₉-alkoholiryhmää lukuun ottamatta. Geometrinen keskiarvo (GM) on laskettu määrittäjärajaa (LOQ) ylittävistä mittaustuloksista. Mediaani (Md), P90-arvo ja maksimiarvo (Max) koskevat koko mittausaineistoa. EU-LCI-arvot ovat EU:ssa rakennusmateriaalien päästöille laadittuja terveysperusteisia arvoja. RW I ja II -arvot ovat saksalaisia sisäilmalle laadittuja terveysperusteisia arvoja. Yhdisteryhmille ilmoitetut määrittäjärajat ovat suuntaa antavia, ja näytekohdaisia eroja saattaa olla johtuen näytetilavuuksien eroista.

Ryhmä	Yhdiste	CAS	Esiintyvyys 2010-2019 näytteissä (>LOQ)	GM ¹ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Md ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	P90 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EU-LCI ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RW I/II ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Alifaattiset hiilivedyt LOQ = 0,4–0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Heptaani	142-82-5	15 %	0,8	<LOQ	0,5	110	15000	–
	Nonaani	111-84-2	13 %	0,6	<LOQ	0,4	35	–	–
	Oktaani	111-65-9	13 %	0,6	<LOQ	0,4	12	–	–
	2,2,4,6,6-Penta- metyyliheptaani	13475-82-6	11 %	1,3	<LOQ	0,4	260	–	–
Aromaattiset hiilivedyt	Bentseeni	71-43-2	65 %	0,7	0,5	1,0	31	– ²	–
	Etyyliibentseeni	100-41-4	23 %	0,8	<LOQ	0,7	380	850	200/2000 ⁴

¹ Geometrinen keskiarvo (GM) on laskettu määrittäjärajaa (LOQ) ylittävistä mittaustuloksista. Mediaani (Md), P90-arvo ja maksimiarvo (Max) koskevat koko mittausaineistoa.

² Terveyshaittojen ehkäisemiseksi ja vähentämiseksi bentseenin pitoisuus ulkoilmassa ei saa ylittää raja-arvoa 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (vuosikeskiarvo; Ilmanlaatuasetus 79/2017).

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste	CAS	Esiintyvyys 2010-2019 näytteissä (>LOQ)	GM ¹ (µg/m ³)	Md (µg/m ³)	P90 (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	EU-LCI (µg/m ³)	RW I/II (µg/m ³)
LOQ = 0,5 µg/m ³	1,2,4-Trimetyyli- bentseeni	95-63-6	15 %	0,7	<LOQ	0,5	62	450	400/4000
	Ksyleeni (p, m)	108-38-3, 106-42-3	60 %	1,0	0,5	2,0	1110	500 ³	100/800 ⁴
	Ksyleeni (o)	95-47-6	27 %	0,8	<LOQ	0,8	370	500 ³	100/800 ⁴
	Tolueeni	108-88-3	81 %	1,1	0,7	3,0	620	2900	300/3000 ⁴
Terpeenit	3-Kareeni	498-15-7	32 %	1,2	<LOQ	2,0	620	1500	200/2000
LOQ = 0,5 µg/m ³	Limoneeni	138-86-3, 5989-27-5, 5989-54-8	25 %	1,3	<LOQ	1,0	1020	5000	1000/10 000
	α-Pineeni	80-56-8	64 %	1,6	0,7	4,0	250	2500	200/2000
	β-Pineeni	127-91-3	10 %	0,8	<LOQ	<LOQ	16	1400	200/2000
Alkoholit	Bentsyylialkoholi	100-51-6	19 %	1,4	<LOQ	0,9	170	440	400/4000
	1-Butanoli	71-36-3	73 %	1,2	0,7	3,0	790	3000	700/2000

³ LCI-arvo 500 µg/m³ on yhteinen ksyleenin kaikille kolmelle isomeerille (o, m, p) sekä niiden seoksille

⁴ Kokonaisohjearvona C7-C8 alkyylibentseeneille (Umweltbundesamt 2020)

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste	CAS	Esiintyvyys 2010-2019 näytteissä (>LOQ)	GM ¹ (µg/m ³)	Md (µg/m ³)	P90 (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	EU-LCI (µg/m ³)	RW I/II (µg/m ³)
LOQ = 0,5 µg/m ³ paitsi propyleenigly- koli 0,8–1 µg/m ³	2-Etyyli-1-hek- sanoli	104-76-7	64 %	1,3	0,6	3,0	230	300	100/1000 ⁵
	2-Metyyli-1-pro- panoli	78-83-1	21 %	0,9	<LOQ	0,8	180	11000	–
	Propyleeniglykoli (1,2-Propaani- dioli)	57-55-6	56 %	2,7	0,8	7,0	720	2100	60/600
Fenolit LOQ = 0,5 µg/m ³	Fenoli	108-95-2	20 %	0,9	<LOQ	0,8	40	70	20/200
Alkoholi- ja fenolieetterit	2-(2-Butoksie- toksi)etanoli	112-34-5	17 %	2,1	<LOQ	2,0	97	350	400/2000 ⁵
	LOQ = 0,5–1 µg/m ³	2-Butoksietanoli	111-76-2	19 %	1,1	<LOQ	0,8	140	1600
2-(2-Etoksie- toksi)etanoli		111-90-0	21 %	2,2	<LOQ	2,0	730	350	700/2000 ⁵

⁵ Alustava arvo

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste	CAS	Esiintyvyys 2010-2019 näytteissä (>LOQ)	GM ¹ (µg/m ³)	Md (µg/m ³)	P90 (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	EU-LCI (µg/m ³)	RW I/II (µg/m ³)
	2-Fenoksietanoli	122-99-6	22 %	1,0	<LOQ	0,9	110	60	30/100
	1-Metoksi-2-propanoli	107-98-2	14 %	1,2	<LOQ	0,7	370	7900	1000/10 000
Aldehydit	Bentsaldehydi	100-52-7	78 %	1,1	1,0	2,0	76	–	20/200 ⁵
LOQ = 0,5 µg/m ³	Dekanaali	112-31-2	62 %	1,2	0,7	2,0	19	900	100/2000
	Heksanaali	66-25-1	56 %	1,5	0,6	3,0	310	900	100/2000
	Heptanaali	111-71-7	17 %	0,7	<LOQ	0,6	20	900	100/2000
	Nonanaali	124-19-6	80 %	1,8	1,0	4,0	75	900	100/2000
	Oktanaali	124-13-0	38 %	0,8	<LOQ	1,0	36	900	100/2000
	Pentanaali	110-62-3	32 %	0,9	<LOQ	1,0	96	800	100/2000
Ketonit	Asetofenoni	98-86-2	23 %	0,7	<LOQ	0,7	25	490	–
LOQ = 0,5 µg/m ³									

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste	CAS	Esiintyvyys 2010-2019 näytteissä (>LOQ)	GM ¹ (µg/m ³)	Md (µg/m ³)	P90 (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	EU-LCI (µg/m ³)	RW I/II (µg/m ³)
Hapot	Heksaanihappo	142-62-1	39 %	2,6	<LOQ	5,0	330	2100	–
LOQ = 0,5–1 µg/m ³	Pentaanihappo	109-52-4	12 %	1,3	<LOQ	0,6	98	2100	–
	Propaanihappo	79-09-4	19 %	1,8	<LOQ	2,0	110	1500	–
Esterit	n-Butyyliasettaatti	123-86-4	14 %	1,1	<LOQ	0,6	150	4800	–
LOQ = 0,3–0,5 µg/m ³	2-(2-Butoksie- toksi)etyyliase- taatti	124-17-4	10 %	1,4	<LOQ	0,3	72	850	–
	Etyyliasettaatti	141-78-6	14 %	1,4	<LOQ	0,7	450	–	600/6000
	Texanol (2,2,4-trimetyyli- 1,3-pentaani- diolimonoisobu- tyraatti)	25265-77-4	23 %	1,5	<LOQ	1,0	320	850	–
	TXIB (2,2,4-trimetyyli- 1,3-pentaani- diolidi-isobuty- raatti)	6846-50-0	23 %	1,4	<LOQ	2,0	100	1300	–

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste	CAS	Esiintyvyys 2010-2019 näytteissä (>LOQ)	GM ¹ (µg/m ³)	Md (µg/m ³)	P90 (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	EU-LCI (µg/m ³)	RW I/II (µg/m ³)
Piiyhdisteet LOQ = 0,5 µg/m ³	Dekametyylisyk- lopentasiloksaani	541-02-6	72 %	2,0	1,0	6,0	680	vireillä	100/1000
TVOC			100 %	28	30	90	4700	-	-

Taulukko 7. Formaldehydipitoisuudet toimistotyypisten työympäristöjen sisäilmassa vuosina 2010–2019 Työterveyslaitoksessa standardiin ISO16000-3 perustuvalla menetelmällä analysoidun aineiston perusteella (toimistot n = 521, koulut n = 938, päiväkodit n = 68, terveydenhuolto n = 184, kaikki yhteensä n = 1711). Geometrinen keskiarvo (GM) on laskettu määritysrajan (LOQ) ylittävistä mittaustuloksista. Mediaani (Md), P90-arvo ja maksimiarvo (Max) koskevat koko mittausaineistoa. EU-LCI-arvot ovat EU:ssa rakennusmateriaalien päästöille laadittuja terveysperusteisia arvoja. RW I ja II -arvot ovat saksalaisia sisäilmalle laadittuja terveysperusteisia arvoja.

Yhdiste	CAS	Esiintyvyys 2010-2019 näytteissä (>LOQ)	GM ¹ (µg/m ³)	Md (µg/m ³)	P90 (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	EU-LCI (µg/m ³)	RW I/II (µg/m ³)
Formaldehydi	50-00-0	94 %	4,4	4,2	13	88	100	100/-
LOQ = 1 µg/m ³								

¹ Geometrinen keskiarvo (GM) on laskettu määritysrajan (LOQ) ylittävistä mittaustuloksista. Mediaani (Md), P90-arvo ja maksimiarvo (Max) koskevat koko mittausaineistoa.

4.3 Muutostrendit

Taulukossa 8 on esitetty VOC-yhdisteiden esiintyvyyden ja pitoisuuden vuosikohtainen tarkastelu 2010–2019 toimistotyyppisten työympäristöjen sisäilmanäytteissä. Taulukkoon on valittu yhdisteitä, joiden esiintyvyydessä on havaittavissa nouseva tai laskeva muutostrendi.

Vuosikymmenen aikana aromaattisten ja alifaattisten hiilivetyjen esiintyvyys on sykloheksaania lukuun ottamatta vähentynyt. Määritysrajan ylittävien näytteiden keskimääräisissä pitoisuuksissa ei ole tapahtunut merkittävää muutosta ja pitoisuudet ovat olleet koko kymmenvuotisen seurantajakson ajan hyvin matalia. Alifaattisten yhdisteiden esiintyvyyden väheneminen liittyy todennäköisesti rakennusmateriaalipäästöjen vähenemiseen sekä siivousmenetelmien ja käytettyjen siivousaineiden muutokseen. Aromaattisten ja alifaattisten yhdisteiden vähenemiseen on todennäköisesti vaikuttanut ilmanvaihdon ja tuloilman suodatuksen paraneminen sekä vähäpäästöisten ajoneuvojen yleistyminen.

Alkoholiyhdisteiden trendeissä näkyy muovimattojen (PVC) pehmittimien vaihtuminen 2000-luvun alkupuolella, jolloin 2-etyyliheksyyliiftalaatti vaihtui di-isononyyliiftalaattiin ja di-isononyylisykloheksaani-1,2-dikarboksylaattiin (DINCH™). 2-Etyyli-1-heksanolin esiintyvyys on laskenut samalla kun C₉-alkoholien on kasvanut. Samanaikaisesti kun C₉-alkoholien esiintyvyys on kasvanut 0 %:sta 12 %:een, tämän yhdisteryhmän keskimääräinen pitoisuus määritysrajan ylittävissä näytteissä on laskenut 12 µg/m³:sta 3 µg/m³:aan. Sen sijaan 2-Etyyli-1-heksanolin pitoisuus määritysrajan ylittävissä näytteissä ei ole muuttunut merkittävästi. C₉-alkoholien esiintyvyyden kasvua saattaa osittain selittää määritysrajan aleneminen analytiikan kehittymisen myötä. Arviomme mukaan tärkeämpi syy C₉-alkoholien esiintyvyyden kasvulle ovat kuitenkin muovimatoissa tapahtuneet materiaali muutokset.

Materiaalimuutoksiin liittyy todennäköisesti myös fenolin esiintyvyyden kasvu vuosikymmenen aikana. Fenolin pitoisuudessa ei ole merkittävää muutosta. Fenolia on siis näytteissä useammin kuin kymmenen vuotta sitten, mutta pitoisuudet näytteissä, joissa fenolia on havaittu, ovat pysyneet ennallaan. Fenolin tunnusomainen haju saattaa lisätä hajuun liittyviä haittakokemuksia.

Aldehydien, sisäilmassa yleisimpien happojen, alkoholi- ja fenolieettereiden, estereiden sekä orgaanisten piiyhdisteiden (dekametyylisyklopentasiloksaani) esiintyvyys on kasvanut. Samanaikaisesti keskimääräiset pitoisuudet määritysrajan ylittävissä näytteissä ovat yleisesti puolittuneet. Näiden yhdisteiden esiintyvyyden kasvu johtuu todennäköisesti ainakin osittain rakennus- ja sisustusmateriaalien muuttumisesta. Toimistojen tilankäytön tehokkuuden kasvu voi myös selittää näiden yhdisteryhmien esiintyvyyden kasvua. Dekametyylisyklopentasiloksaanin esiintyvyyden kasvu saattaa liittyä siloksaanien

lisääntyneeseen käyttöön hygieniatuotteissa ja antiperspiranteissa (Weschler 2009). Siloksaaneja käytetään myös lianhylijintäineena tekstiileissä ja siivousaineissa.

Taulukko 8. VOC-yhdisteiden esiintyvyyden ja pitoisuuden vuosikohtainen tarkastelu 2010–2019 toimistotyyppisten työympäristöjen sisäilmasta otetuissa näytteissä. Taulukkoon on valittu yhdisteitä, joiden esiintyvyydessä on havaittavissa nouseva tai laskeva muutostrendi. Geometrinen keskiarvo (GM) ja geometrinen keskihajonta (GSD) on laskettu määrittämissä (LOQ) ylittävistä näytetuloksista.

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
Alifaattiset hiilivedyt	Sykloheksaani 110-82-7	↗	>LOQ	3 %	2 %	5 %	3 %	3 %	4 %	4 %	6 %	8 %	8 %
			GM (µg/m ³)	1,3	1,2	2,5	1,5	1,9	4,0	0,9	1,2	1,1	1,6
			GSD (µg/m ³)	1,4	1,1	2,8	1,0	2,0	7,9	0,8	1,3	1,1	1,3
Heptaani 142-82-5		↘	>LOQ	20 %	20 %	22 %	16 %	12 %	13 %	12 %	9 %	11 %	13 %
			GM (µg/m ³)	0,8	0,7	1,2	1,0	0,9	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8
			GSD (µg/m ³)	1,0	0,9	1,5	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	0,7	1,0
Nonaani 111-84-2		↘	>LOQ	24 %	25 %	23 %	20 %	15 %	9 %	5 %	3 %	6 %	5 %
			GM (µg/m ³)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,8
			GSD (µg/m ³)	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,8	0,6	0,3	0,6	1,4

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
	Oktaani 111-65-9	▼	>LOQ	24 %	32 %	24 %	15 %	14 %	5 %	4 %	3 %	5 %	4 %
			GM (µg/m ³)	0,6	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5
			GSD (µg/m ³)	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3
	Pentadekaani 629-62-9	▼	>LOQ	7 %	4 %	4 %	3 %	7 %	5 %	4 %	2 %	3 %	3 %
			GM (µg/m ³)	0,6	0,6	0,7	0,9	0,9	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
			GSD (µg/m ³)	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,3	0,4	0,8	0,5
	Tetradekaani 629-59-4	▼	>LOQ	9 %	6 %	10 %	6 %	10 %	8 %	6 %	3 %	4 %	3 %
			GM (µg/m ³)	0,6	0,6	0,8	0,8	1,1	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8
			GSD (µg/m ³)	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
Aromaattiset hiilivedyt	Bentseeni 71-43-2	▼	>LOQ	98 %	89 %	73 %	70 %	59 %	52 %	61 %	49 %	56 %	49 %
			GM (µg/m ³)	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
	Etyyllibentseeni 100-41-4	↘	>LOQ	47 %	36 %	22 %	21 %	17 %	24 %	20 %	14 %	20 %	18 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,6	0,6	1,0	1,1	0,8	1,2	0,8	0,7	0,7	0,7
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,8	0,7	1,0	1,3	0,7	1,7	0,8	0,7	0,7	1,1
	1,2,4-Trime- tyyllibentseeni 95-63-6	↘	>LOQ	31 %	23 %	13 %	15 %	9 %	14 %	17 %	9 %	11 %	12 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,6	0,6	0,8	0,9	0,7	1,0	0,8	0,6	0,6	0,6
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	1,1	0,8	0,5	0,5	0,7
	Ksyleenit (p, m) 106-42-3 108-38-3	↘	>LOQ	84 %	73 %	66 %	54 %	53 %	60 %	58 %	49 %	60 %	52 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,9	0,9	1,0	1,3	1,0	1,3	0,9	0,9	0,9	0,9
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,1	0,9	1,0	1,3	0,8	1,9	1,0	0,9	0,9	1,1
	Ksyleeni (o) 95-47-6	↘	>LOQ	48 %	38 %	25 %	24 %	21 %	26 %	26 %	17 %	26 %	22 %

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
			GM (µg/m ³)	0,6	0,6	0,9	1,1	0,8	1,4	0,8	0,8	0,7	0,8
			GSD (µg/m ³)	0,8	0,7	0,9	1,3	0,7	2,0	0,7	0,9	0,8	1,1
	Styreeni 100-42-5	↘	>LOQ	5 %	7 %	7 %	6 %	5 %	5 %	7 %	5 %	4 %	4 %
			GM (µg/m ³)	0,7	0,8	1,2	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,6	0,8
			GSD (µg/m ³)	1,0	1,1	1,2	0,7	0,7	1,3	0,5	0,9	0,7	0,6
Alkoholit	C ₉ -alkoholit	↗	>LOQ	0 %	0,3 %	3 %	1 %	2 %	1 %	4 %	4 %	9 %	12 %
			GM (µg/m ³)	-	12	11	4,2	5,9	16	3,9	4,2	2,7	2,7
			GSD (µg/m ³)	-	1,0	0,8	0,8	0,9	1,6	1,5	1,0	1,1	0,9
	2-Etyyli-1- heksanoli 104-76-7	↘	>LOQ	80 %	67 %	63 %	60 %	74 %	59 %	64 %	60 %	60 %	59 %
			GM (µg/m ³)	1,2	1,8	2,0	1,6	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,4
			GSD (µg/m ³)	1,2	1,4	1,3	1,0	0,9	1,1	1,0	1,3	1,2	1,8

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
Fenolit	Fenoli 108-95-2	↗	>LOQ	18 %	11 %	11 %	10 %	12 %	11 %	34 %	27 %	26 %	30 %
			GM (µg/m ³)	1,0	1,0	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	0,9	0,7	0,7
			GSD (µg/m ³)	0,7	0,6	0,8	0,8	1,0	0,6	1,0	0,9	0,5	0,6
Alkoholi- ja fenolieetterit	2-Butoksieta- noli 111-76-2	↗	>LOQ	8 %	12 %	13 %	14 %	16 %	27 %	26 %	29 %	23 %	17 %
			GM (µg/m ³)	1,7	1,2	1,1	1,5	1,2	2,0	1,0	1,0	1,0	0,9
			GSD (µg/m ³)	0,9	1,3	0,8	1,2	1,1	2,9	1,2	1,1	1,1	1,0
	2-Fenoksieta- noli 122-99-6	↗	>LOQ	13 %	22 %	27 %	28 %	22 %	28 %	25 %	17 %	18 %	18 %
			GM (µg/m ³)	1,6	1,2	1,2	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8
			GSD (µg/m ³)	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0	0,6	0,7	0,7
Aldehydit	Bentsaldehydi 100-52-7	↗	>LOQ	67 %	58 %	65 %	76 %	77 %	86 %	87 %	87 %	85 %	90 %
			GM (µg/m ³)	1,8	1,7	1,3	1,4	1,3	1,0	1,1	0,9	0,9	0,9

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
	Dekanaali 112-31-2	↗	>LOQ	47 %	48 %	52 %	53 %	60 %	72 %	71 %	64 %	75 %	75 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,7	1,7	1,7	1,5	1,5	1,3	1,0	0,9	1,0	1,0
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7
	Heptanaali 111-71-7	↗	>LOQ	12 %	20 %	13 %	14 %	15 %	12 %	10 %	13 %	25 %	31 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,7	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,7	0,5	0,5
	Nonanaali 124-19-6	↗	>LOQ	60 %	70 %	70 %	73 %	75 %	87 %	90 %	89 %	90 %	88 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,2	2,4	2,3	2,0	2,2	1,9	1,7	1,5	1,6	1,4
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8
	Oktanaali 124-13-0	↗	>LOQ	23 %	50 %	27 %	28 %	38 %	35 %	37 %	37 %	50 %	45 %

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimitustyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4
	Pentanaali 110-62-3	↗	>LOQ	23 %	27 %	18 %	20 %	16 %	39 %	40 %	38 %	49 %	44 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,3	1,0	1,0	1,2	1,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,7	0,7	0,7	0,9	1,2	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7
Ketonit	Asetofenoni 98-86-2	↗	>LOQ	2 %	8 %	18 %	31 %	28 %	15 %	26 %	25 %	36 %	31 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,3
	2-Butanoni 78-93-3	↘	>LOQ	12 %	18 %	9 %	8 %	4 %	11 %	5 %	4 %	3 %	3 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,0	1,1	1,4	1,6	2,6	2,2	1,9	3,3	2,3	2,1
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,8	1,5	0,9	1,2	1,3	1,6	1,5	1,9	0,8	1,5

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
Hapot	Heksaani- happo 142-62-1	↗	>LOQ	21 %	31 %	22 %	23 %	28 %	47 %	51 %	56 %	51 %	55 %
			GM (µg/m ³)	3,8	3,9	3,7	4,4	5,6	2,7	2,1	2,2	2,0	1,6
			GSD (µg/m ³)	1,0	0,9	0,8	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
	Propaani- happo 79-09-4	↗	>LOQ	10 %	12 %	6 %	12 %	6 %	20 %	21 %	22 %	28 %	46 %
			GM (µg/m ³)	4,0	4,0	3,1	4,0	4,1	1,8	1,8	1,9	1,4	1,0
			GSD (µg/m ³)	1,1	1,0	0,6	0,8	0,6	1,2	1,0	0,8	0,8	0,8
Esterit	Etyyliasettaatti 141-78-6	↗	>LOQ	12 %	15 %	15 %	9 %	8 %	16 %	13 %	14 %	18 %	23 %
			GM (µg/m ³)	1,7	1,2	1,8	1,4	1,7	1,9	1,4	1,4	1,3	1,2
			GSD (µg/m ³)	1,3	1,1	1,9	1,1	1,7	3,4	1,4	1,3	1,8	1,3
	Texanol 25265-77-4	↗	>LOQ	11 %	17 %	19 %	22 %	28 %	28 %	25 %	27 %	31 %	20 %
			GM (µg/m ³)	2,3	1,8	1,6	1,7	1,6	1,7	1,4	1,3	1,6	1,3

Työterveyslaitos

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä

Ryhmä	Yhdiste CAS-numero	Trendi	Vuosi (n)	2010 (807)	2011 (971)	2012 (975)	2013 (977)	2014 (995)	2015 (620)	2016 (1089)	2017 (1153)	2018 (1129)	2019 (1073)
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,2	1,5	1,0	1,6	1,4	1,9	1,4	1,5	2,1	1,7
	TXIB 6846-50-0	↗	>LOQ	16 %	19 %	21 %	24 %	27 %	23 %	31 %	20 %	25 %	22 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,4	1,9	1,3	1,7	2,4	1,7	1,3	1,1	1,0	1,1
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,2	1,3	1,1	1,0	1,5	1,1	1,2	1,2	1,0	1,2
Piiyhdisteet	Dekametyyli- syklopenta- siloksaani 541-02-6	↗	>LOQ	57 %	69 %	75 %	70 %	70 %	74 %	73 %	73 %	76 %	74 %
			GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,7	2,5	2,4	2,2	2,4	2,3	1,8	1,7	1,5	1,4
			GSD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,2	1,5	1,3	1,3	1,6	1,8	1,6	1,5	1,3	1,3

5 HAITALLISET TERVEYSVAIKUTUKSET

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat kemialliselta rakenteeltaan ja siten myös mahdollisten haitallisten terveysvaikutustensa osalta hyvin monenlaisia. Mahdolliseen terveysriskiin vaikuttavat sekä yhdisteen vaaraominaisuudet että yhdisteelle altistuminen. Tunnetut vaaraominaisuudet on huomioitu terveysperusteisia arvoja asetettaessa. Altistumisen terveydellisen merkityksen kannalta olennaista on erityisesti kolme asiaa: 1) millä altistumistasoilla on tunnettuja haitallisia terveysvaikutuksia, 2) kuinka pitkään ja toistuvasti altistuminen jatkuu sekä minkälaisille pitoisuuksille altistutaan ja 3) mitä reittiä yhdiste kulkeutuu elimistöön.

Haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä, jos altistumistaso jää matalammaksi kuin se taso, jonka yläpuolella yhdisteen on arvioitu aiheuttavan haittavaikutuksia. Altistumistaso, jonka alittuessa haitalliset terveysvaikutukset ovat epätodennäköisiä, pystytään yleensä määrittämään, jos käytettävissä on riittävästi asianmukaisia ja luotettavia tutkimuksia. Poikkeuksen tästä tekevät niin kutsutut perimämyrkylliset syöpävaaralliset aineet, joille ei tyypillisesti voida määrittää turvallista altistumistasoa. Tällöin lasketaan syövän riskitasoja eri suuruisille altistuspitoisuuksille, ja raja-arvot pyritään asettamaan siten, että kyseisillä pitoisuuksilla riskit jäävät erittäin pieniksi. Terveysperusteiset arvot sisältävät turvamarginaaleja, ja arvoja päivitetään tarvittaessa uuden tiedon perusteella.

Yhdisteestä ja sen aiheuttaman haittavaikutuksen mekanismista riippuen haitallisia terveysvaikutuksia voi ilmetä välittömästi tai pian altistumisen alettua tai vasta pidemmän tai toistuvan altistumisen seurauksena. Jos haitallinen vaikutus kehittyy vasta pidempään jatkuvan tai toistuvan altistumisen myötä, haittavaikutukset eivät ole todennäköisiä lyhytaikaisen altistumisen seurauksena. Sama yhdiste voi myös aiheuttaa toisistaan poikkeavia lyhyt- ja pitkäkestoisesta altistumisesta aiheutuvia haittoja. Yhdiste voi esimerkiksi aiheuttaa korkeina pitoisuuksina jo lyhyessä ajassa ärsytysvaikutuksia, mutta muita sille ominaisia haitallisia vaikutuksia vasta toistuvan altistumisen seurauksena pidemmän ajan kuluessa.

Altistumisreitti voi yhdisteestä riippuen olla olennainen. Esimerkiksi hengitysteihin kohdistuvat haittavaikutukset kehittyvät useimmiten ainoastaan hengitysteitse altistuttaessa.

5.1 Haitalliset terveysvaikutukset toimistotyypissä työympäristöissä

Toimistotyypisten työympäristöjen sisäilmassa vuosina 2010–2019 yleisimmin esiintyneiden VOC-yhdisteiden (taulukko 6) koko aineistosta lasketut P90-arvot jäivät poikkeuksetta selvästi kunkin yhdisteen EU-LCI- ja RW I/II -arvotasoa matalammiksi, alle 2 %:iin

EU-LCI-arvoista ja alle 12 %:iin RW I -arvoista. Niissä kohteissa, joissa näitä yhdisteitä havaittiin, mittaustulosten geometriset keskiarvot jäivät alle 2 %:iin EU-LCI-arvoista ja alle 6 %:iin RW I -arvoista. Formaldehydin P90-pitoisuus oli 13 % EU-LCI- ja RW I -arvoista (100 µg/m³), ja geometrinen keskiarvo 4 % näistä arvoista (taulukko 7). Siten voidaan katsoa, että toimistotyypissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla yksittäisten haihtuvien orgaanisten yhdisteiden aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset ovat nykytiedon valossa epätodennäköisiä. Mahdollisia yhteisvaikutuksia ei pystytä kuitenkaan tämän aineiston perusteella arvioimaan, joskaan yleisesti aineistosta ei nouse erityistä huolta yhteisvaikutuksiin liittyen, kts. tarkemmin edempänä.

Joissakin aineistomme kohteissa mitattiin kuitenkin paikoin huomattavastikin tavanomaisia pitoisuustasoja korkeampia maksimiarvoja (taulukko 6). Osa näistä maksimiarvoista ylitti myös EU-LCI- ja RW I/II -arvotasot, suurimmaksi osaksi kuitenkin korkeintaan 2–4-kertaisesti. EU-LCI-arvotason noin 2–3-kertaisesti ylittäneitä maksimiarvoja mitattiin yksittäisissä kohteissa ksyleeneille, 2-(2-etoksietoksi)etanolille ja 2-fenoksietanolille, muut maksimipitoisuudet jäivät EU-LCI-arvojen alapuolelle. RW I -arvotason taas ylitti yli puolet maksimiarvoista, ja näistä ksyleenien, propyleeniglykolin ja 2-fenoksietanolin maksimiarvot ylittivät myös RW II -arvotason. Kaikki maksimiarvot alittivat HTP-arvotason selvästi, tyypillisimmin arvot jäivät selvästi alle 1 %:iin HTP_{8h}-arvosta.

EU-LCI ja/tai RW I -arvotason ylittäneistä yhdisteistä korkeintaan 2–4-kertaisia ylityksiä mitattiin seuraaville yhdisteille: etyylibentseeni, ksyleeni (o), tolueeni, 3-kareeni, limoneneeni, α-pineeni, 1-butanoli, 2-etyyli-1-heksanoli, fenoli, 2-(2-etoksietoksi)etanolin, 2-fenoksietanolin, bentsaldehydin ja heksanaalin. Kaikki em. yhdisteet voivat olla korkeilla pitoisuuksilla silmiä, hengitysteitä ja osa myös ihoa ärsyttäviä. Sekä EU-LCI- että RW I -arvot on kuitenkin johdettu turvakertoimia käyttäen niin, että niissä huomioidaan mm. koko väestö (ml. herkkimmät yksiköt), koko eliniän jatkuva altistuminen ja erilaiset koeasetelmista aiheutuvat epävarmuudet. Käytetyt turvakertoimet ovat tyypillisesti korkeita, jopa 100–1000-kertaisia. Siten korkeintaan 2–4-kertaisia EU-LCI tai RW I -tasojen ylityksiä voidaan pitää suhteellisen vähäisinä, eivätkä ärsytysvaikutukset tai muutenkaan haitalliset terveysvaikutukset ole em. yhdisteille tällaisillakaan pitoisuustasoilla todennäköisiä. Yleisesti toimenpiteitä päästölähteiden selvittämiseksi ja tarvittaessa päästöjen vähentämiseksi on silti suositeltavaa tehdä, jos mitatut pitoisuudet ylittävät terveysperusteisten arvojen tason. Käytettäessä terveysperusteisia arvoja mittaustulosten terveydellisen merkityksen tulkintaan, on syytä huomioida ko. arvot tulkintaohje.

Ksyleeneille (p, m), propyleeniglykolille ja dekametyyliisoklopentasiloksaanille mitattiin joissakin kohteissa maksimiarvoja, jotka ylittivät RW I -arvot 7–12-kertaisesti. Näistä ksyleenien (p, m) ja propyleeniglykolin sekä lisäksi 2-fenoksietanolin maksimiarvot ylittivät myös lievästi (alle 2-kertaisesti) RW II -arvotason. RW II -tason määritelmän mukaisesti tämä tarkoittaa, että haitallisia terveysvaikutuksia saattaa esiintyä tällaisilla

pitoisuustasoilla, erityisesti esimerkiksi perussairauksien vuoksi tavanomaista herkemmillä henkilöillä, jos he altistuvat RW II -arvon ylittävälle pitoisuuksille pitkiä ajanjaksoja. Esimerkiksi astmaa sairastavat voivat olla tavanomaista herkempiä hengitysteitä ärsyttävälle yhdisteille, joita kaikki neljä em. yhdistettä ovat. Muilla em. maksimipitoisuuksien mahdollisesti aiheuttamat terveyshaitat olisivat todennäköisimmin korkeintaan lieviä ja ohimeneviä ärsytysvaikutuksia. Kuitenkin, kuten edelläkin on todettu, selvitys- ja tarvittaessa hallintatoimenpiteisiin on suositeltavaa ryhtyä, jos tällaisia pitoisuustasoja mitataan.

Aineistosta nousee esiin lisäksi bentseeni, jolle ei ole saatavilla EU-LCI tai RW I/II -arvoja. Tyypillisimmin bentseeni on sisäilmassa esiintyessään peräisin joko ulkoa tulleista liikennepäästöistä tai tupakansavusta. Aineistomme bentseenin P90-arvo $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on 20 % ulkoilmassa sallitusta bentseenipitoisuudesta $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (vuosikeskiarvo). Niissä kohteissa, joissa bentseeniä havaittiin, mittausten geometrinen keskiarvo $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oli 14 % sallitusta ulkoilman bentseenipitoisuudesta. Näillä pitoisuustasoilla ei nykytiedon valossa esiinny haitallisia terveysvaikutuksia. Myös syöpäriski on nykytiedon valossa näillä pitoisuustasoilla käytännössä olematon. Mitattu maksimiarvo $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ylittää bentseenin ulkoilmassa sallitun pitoisuustason noin kuusinkertaisesti. Kyseessä on kuitenkin yksittäinen mittaustulos. Jos tällaisissa poikkeavissa mittaustuloksissa ei ole kyse satunnaisesta piikki-pitoisuudesta, päästölähde täytyy selvittää ja ryhtyä tarvittaviin hallintatoimenpiteisiin.

VOC-yhdisteiden hajukynnykset voivat yhdisteestä riippuen olla huomattavastikin EU-LCI ja RW -tasoja matalampia. Viihtyvyyteen vaikuttavia hajuhaittoja saattaa siis esiintyä, vaikka haitalliset terveysvaikutukset eivät olisi todennäköisiä. Hajuhaitan kokemiseen vaikuttavat myös yksilölliset tekijät, ja voimakkaat haittakokemukset voivat johtaa välillisiin terveyshaittoihin.

Yksittäisten VOC-yhdisteiden sijaan sisäilmassa esiintyy useampia VOC-yhdisteitä, jolloin mahdollisia terveydelle haitallisia yhteisvaikutuksia saatetaan joutua huomioimaan. Toimistotyypissä työympäristöissä yhteisvaikutukset voisivat liittyä lähinnä useiden samanaikaisesti esiintyvien yhdisteiden aiheuttamiin silmien tai hengitysteiden ärsytysvaikutuksiin. Ärsytysvaikutukset ovat häiritseviä, mutta altistumisen loppuessa ohimeneviä oireita, joista ei jää pysyvää terveyshaittaa. Aineistostamme ei kuitenkaan analysoitu useiden haihtuvien orgaanisten yhdisteiden samanaikaista esiintyvyyttä mittauskohteissa, joten mahdollisten yhteisvaikutusten esiintymisen todennäköisyyteen ei voida ottaa kantaa. Yleisesti aineistosta ei kuitenkaan nouse esiin erityisiä huolia yhteisvaikutuksiin liittyen, koska tavanomaiset yksittäisten yhdisteiden pitoisuustasot olivat huomattavan matalia terveysperusteisiin viitearvoihin verrattuna. Toimistotyypisten työympäristöjen sisäilman terveysvaikutusten arvioinnissa lienee siten harvoin tarpeellista arvioida yhteisvaikutuksia. Tarvittaessa kuitenkin tapauskohtainen, toksikologinen asiantuntija-arvio on mahdollista tehdä.

5.2 Haitalliset terveysvaikutukset suurissa pitoisuuksissa

Kuten edellä on todettu, haitalliset terveysvaikutukset eivät ole aineistomme perusteella todennäköisiä toimistotyypissä työympäristöissä mitatuilla haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksilla. Alla on kuvattu korkeammilla pitoisuustasoilla mahdollisia haitallisia terveysvaikutuksia aineistossamme yleisesti esiintyneille yhdisteille sekä harvinaisemmin esiintyville yhdisteille, jotka herättävät usein kysymyksiä. Tällaisia vaikutuksia saattaa esiintyä HTP-arvotason ylittyessä esimerkiksi teollisuudessa. Tietolähteinä on käytetty Euroopan kemikaaliviraston (ECHA) tietokantaa (ECHA 2020), EU-LCI-arvojen perustelu-muistioita ja niissä olleita viitteitä (EU-LCI Working Group 2019b), HTP-arvojen perustelu-muistioita ja niissä olleita viitteitä (Työsuojeluhallinto 2020), onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet -turvallisuusohjeita (Työterveyslaitos 2020), kansainvälisiä kemikaalikortteja (ILO 2020), Kansainvälisen syöväntutkimuslaitoksen (IARC) monografioita (IARC 2020) ja tarvittaessa myös muuta kirjallisuutta.

5.2.1 Alifaattiset hiilivedyt

Useat alifaattiset hiilivedyt, kuten aineistomme mittauskohteissa tavallisimmin esiintyneet n-heptaani (esiintyvyyttä 15 %), nonaani (13 %) ja oktaani (13 %), ovat korkeilla pitoisuuksilla ihoa, silmiä ja hengitysteitä ärsyttäviä. Lisäksi ne saattavat vaikuttaa korkeilla pitoisuuksilla jo lyhyenkin altistumisajan seurauksena keskushermostoon, aiheuttaen uneliaisuutta ja huimausta. Tällaiset vaikutukset eivät kuitenkaan ole todennäköisiä toimistotyypissä työympäristöissä mitatuilla pitoisuuksilla. Em. kolmesta yleisimmästä yhdisteestä ainoastaan n-heptaanille on johdettu EU-LCI-arvo, 15 000 µg/m³. Myös nonaanin ja oktaanin EU-LCI-arvot asettuisivat todennäköisesti samaan kertaluokkaan kuin n-heptaanin, huomioiden näiden kolmen yhdisteen ominaisuudet sekä sen, että niiden HTP-arvot ovat samaa kertaluokkaa. Millekään näistä kolmesta yhdisteestä ei ole saatavilla RW I tai II -arvoja. Niissä kohteissa, joissa n-heptaania, nonaania ja oktaania esiintyi yli määrittämissä rajoissa, pitoisuuksien geometriset keskiarvot olivat välillä 0,6–0,8 µg/m³. Koko aineiston P90-arvo oli n-heptaanille 0,5 µg/m³, nonaanille ja oktaanille ne jäivät mittausrajan alapuolelle. N-heptaanin maksimiarvo oli 110 µg/m³, nonaanin 35 µg/m³ ja oktaanin 12 µg/m³. Kaikille kolmelle yhdisteelle on johdettu HTP-arvot, joista 8 tunnin arvot ovat välillä 1100–1400 mg/m³ (1100 000–1400 000 µg/m³, voimaantumisasiänsä vuodet 1981 tai 1996) ja 15 minuutin arvot välillä 1300–2100 mg/m³.

5.2.2 Aromaattiset hiilivedyt

Bentseeni on korkeilla pitoisuuksilla silmiä, ihoa ja hengitysteitä ärsyttävä aine, lyhytaikaisen altistumisen pitoisuudelle 9 700 mg/m³ (9 700 000 µg/m³) on raportoitu aiheuttaneen näitä vaikutuksia. Useamman tunnin altistuminen pitoisuustasoille 160–480 mg/m³ (160 000–480 000 µg/m³) on raportoitu voivan aiheuttaa päänsärkyä, heikkoutta ja

väsymystä. Hyvin korkeilla pitoisuuksilla bentseeni voi vahingoittaa keskushermostoa ja aiheuttaa tajuttomuutta. Bentseeni on myös tunnetusti ihmisille syöpävaarallinen aine ja saattaa aiheuttaa perimävaurioita. Bentseenin syöpävaarallisuus kohdistuu luuytimeen, jota se voi vahingoittaa pitkäaikaisessa tai toistuvassa altistumisessa. Bentseenin tiedetäänkin voivan aiheuttaa akuuttia myelooista leukemiaa. Lisäksi on viitteitä siitä, että bentseeni saattaa aiheuttaa myös akuuttia lymfaattista leukemiaa, kroonista lymfaattista leukemiaa, multippelia myeloomaa ja non-Hodgkinin lymfoomaa. Aiemmin bentseeni on teollisuuden työpaikoilla korkeille pitoisuuksille altistuttaessa aiheuttanut työperäisiä leukemioita, mutta nykyään nämä syövät ovat hyvin harvinaisia myös teollisilla työpaikoilla.

Työperäisen altistumisen osalta useissa asiantuntija-arvioissa on katsottu syöpävaarallisuuden kannalta merkitseväksi bentseenin kumulatiiviseksi altistumistasoksi noin 40 ppm-vuotta, eli esimerkiksi altistuminen 1 ppm:n pitoisuustasolle ($3,25 \text{ mg/m}^3$ eli $3250 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) joka työpäivä 40 vuoden ajan (IARC 2018, RAC 2018, Työterveyslaitos 2013, SCOEL 1991). Todennäköisesti kuitenkin myös hyvin korkeat piikkipitoisuudet suhteellisen lyhyen ajanjakson kuluessa ovat olennaisia. Toimistotyypissä työtiloissa mahdollisesti esiintyvät bentseenipitoisuudet eivät ole nykytiedon valossa olennaisia syöpärisikin tai muidenkaan terveysriskien kannalta.

Aineistossamme matalia bentseenipitoisuuksia esiintyi 65 %:ssa mittauskohteista. Niissä kohteissa, joissa bentseeniä esiintyi, mittausten geometrinen keskiarvo oli $0,7 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Yksittäinen mitattu maksimipitoisuus oli $31 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, mutta koko aineiston P90-arvo oli $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Bentseenille ei ole EU-LCI tai RW I/II -arvoja. Bentseenin sitova työperäinen raja-arvo on $3,25 \text{ mg/m}^3$ ($3250 \text{ } \mu\text{g/m}^3$). Lisäksi Suomessa on asetettu ulkoilman bentseenipitoisuuden raja-arvoksi $5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (vuosikeskiarvo), jonka tarkoitus on ehkäistä ja vähentää terveyshaittoja (Ilmanlaatuasetus 79/2017).

Etyylibentseeni on korkeilla, selvästi HTP_{8h} -arvotason 220 mg/m^3 ($220\,000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) ylläviillä pitoisuuksilla silmiä, ihoa ja hengitysteitä ärsyttävä aine. Lisäksi se voi aiheuttaa korkeilla pitoisuuksilla keskushermosto-oireita kuten päänsärkyä, huimausta ja väsymystä sekä vaurioittaa pitkäaikaisen altistumisen seurauksena kuuloa. Koe-eläimissä etyylibentseeni on aiheuttanut korkeilla annoksilla haitallisia vaikutuksia munuaisissa ja maksassa sekä syöpää, jonka takia sitä pidetään mahdollisesti myös ihmisessä syöpää aiheuttavana aineena. Muutamista saatavilla olevista epidemiologisista tutkimuksista ei kuitenkaan ole näyttöä syöpävaarallisuudesta ihmisissä. Lisäksi koe-eläimissä on nähty korkeilla annostuksilla vaikutuksia lisääntymisterveyteen. Etyylibentseeniä esiintyi 23 %:ssa aineistomme kohteista hyvin matalina pitoisuuksina, joilla edellä mainitut haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä. Kohteissa, joissa etyylibentseeniä esiintyi, mittaustulosten geometrinen keskiarvo oli $0,8 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, joka jäi selvästi terveysperusteisten arvojen alapuolelle: EU-LCI $850 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, RW I $200 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ja RW II $2000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Koko aineiston P90-arvo oli $0,7 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Yksittäisestä kohteesta mitattu maksimiarvo $380 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ylitti RW I -arvon, mutta

jäi selvästi sekä RW II että EU-LCI -arvojen alapuolelle. Siten, näiden arvojen sisältämien korkeiden turvakertoimien vuoksi, haitalliset terveysvaikutukset eivät ole tälläkään pitoisuustasolla todennäköisiä. Edellä mainitun 8 tunnin HTP-arvon lisäksi etyylibentseenille on 15 minuutin HTP-arvo 880 mg/m^3 ($880\,000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, voimaanastumisvuosi 2002).

Ksyleenit eli ksyleenin m-, o- ja p-isomeerit ovat korkeilla pitoisuuksilla silmiä, hengitysteitä ja ihoa ärsyttäviä. Ne voivat myös aiheuttaa korkeilla pitoisuuksilla vaikutuksia keskushermostossa, kuten hermostuneisuutta, muistihäiriöitä, humalantunnetta ja heikentyntä ruokahalua. Ksyleenien aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset eivät kuitenkaan ole todennäköisiä toimistotyypisissä työympäristöissä mitatuilla pitoisuuksilla. Aineistossamme p- ja m-ksyleenejä esiintyi yli määräysrajan 60 %:ssa mittaushetkistä, lisäksi o-ksyleeniä esiintyi yli määräysrajan 27 %:ssa kohteista. Näissä kohteissa geometriset keskiarvot olivat välillä $0,8\text{--}1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$. Koko aineiston P90-arvot olivat välillä $0,8\text{--}2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$. Nämä jäivät huomattavasti kaikille kolmelle isomeerille yhteisten terveysperusteisten arvojen alapuolelle: EU-LCI $500 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, RW I $100 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ja RW II $800 \text{ }\mu\text{g/m}^3$. Mitatut maksimi-arvot (p- ja m-ksyleenit $1110 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, o-ksyleeni $370 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) ylittivät nämä em. terveysperusteiset arvot, lievästi myös RW II -arvon. Ksyleenien yhteinen 8 tunnin HTP-arvo on 220 mg/m^3 ($220\,000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) ja 15 minuutin arvo 440 mg/m^3 ($440\,000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, voimaanastumisvuosi 2002).

Tolueneeni on korkeilla pitoisuuksilla ärsyttävää iholle, silmille ja hengitysteille. HTP-arvotason yläpuolella se voi aiheuttaa värinäön häiriötä, lisätä melun aiheuttamaa kuulon alenemaa ja aiheuttaa haitallisia keskushermostoon ja sydämen toimintaan kohdistuvia vaikutuksia. Korkeille pitoisuuksille altistumisen on myös epäilty voivan aiheuttaa keskenmenoja. Hyvin korkeille pitoisuuksille (yli $18\,750 \text{ mg/m}^3$ eli $18\,750\,000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) altistuminen voi johtaa lyhyessäkin ajassa tajunnan menetykseen ja hengenvaaraan. Aineistossamme tolueneenia esiintyi hyvin matalilla pitoisuuksilla valtaosassa kohteista (esiintyvyys 81 %). Mitattujen tolueneenipitoisuuksien geometrinen keskiarvo oli $1,1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, koko aineiston P90-arvo oli $3 \text{ }\mu\text{g/m}^3$. Nämä mittaustulokset jäivät selvästi alle terveysperusteisten raja-arvojen: EU-LCI $2900 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, RW I $300 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, RW II $3000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$. Mitattu maksimipitoisuus $620 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ylitti RW I -arvon, mutta jäi selvästi EU-LCI ja RW II -arvojen alapuolelle. Toimistotyypisissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla tolueneenin aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset eivät siis ole todennäköisiä. Tolueneenin 8 tunnin HTP-arvo on 81 mg/m^3 ($81\,000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, voimaanastumisvuosi 2009) ja 15 minuutin HTP-arvo 380 mg/m^3 ($380\,000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$).

Naftaleeni on korkeilla pitoisuuksilla ihoa, silmiä ja hengitysteitä ärsyttävä aine. Pitkäaikainen naftaleenin aiheuttama silmä-ärsytys voi aiheuttaa sarveiskalvon haavaumaa ja kaihia. Korkeille pitoisuuksille altistuminen voi aiheuttaa myös verisolujen vahingoittamista ja kroonista hemolyyttistä anemiamia. Eläinkokeista saatuun tietoon perustuen naftaleenin epäillään voivan aiheuttaa korkeilla, vakavia paikallisia ärsytyksivaikutuksia

aiheuttavilla pitoisuuksilla nenäsyöpää. Nämä vaikutukset eivät kuitenkaan ole nykytiedon valossa olennaisia matalilla pitoisuustasoilla. VOC-aineistomme mittauskohteissa naftaleenia ei esiintynyt yleisesti. Aineistossa ei kuitenkaan ollut mukana kohteita, joissa on epäilty erityisesti PAH-altistumista. Näissä kohteissa Työterveyslaitoksen vuosina 2010–2015 keräämässä PAH-altistumisaineistossa (mm. toimistot, oppilaitokset, päiväkodit) naftaleenin keskipitoisuus oli $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediaani, $n = 1035$) ja 89 % mittaustuloksista alitti tavoitetason $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Työterveyslaitos 2016). Naftaleenille on useita terveysperusteisia arvoja: EU-LCI $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alustava RW I $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alustava RW II $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{HTP}_{8\text{h}}$ $5 \text{mg}/\text{m}^3$ ($5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, voimaanastumisvuosi 2007) ja $\text{HTP}_{15\text{min}}$ $10 \text{mg}/\text{m}^3$ ($10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

5.2.3 Terpeenit

Terpeenit voivat olla suurina pitoisuuksina ihoa ja silmiä ärsyttäviä. Toistuvan ihoaltistumisen seurauksena ne voivat myös aiheuttaa allergista kosketushottumaa. Toimistotyypissä sisäympäristöissä ei ole todennäköistä, että terpeenit aiheuttaisivat haitallisia terveysvaikutuksia. Aineistomme perusteella yleisimmin toimistotyypissä sisäympäristöissä esiintyviä terpeenejä ovat α -pineeni (esiintyvyys 64 %), 3-kareeni (32 %) ja limoneeni (25 %). Kaikissa kohteissa, joissa näitä yhdisteitä esiintyi yli määritysrajan, niiden pitoisuuksien geometriset keskiarvot olivat välillä $1,2\text{--}1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koko aineiston P90-arvot olivat välillä $1\text{--}4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja maksimiarvot välillä $250\text{--}1020 \mu\text{g}/\text{m}^3$. α -pineenin, 3-kareenin ja limoneenin EU-LCI-arvot ovat välillä $1500\text{--}5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RW I -arvot $200\text{--}1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja RW II -arvot $2000\text{--}10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Näistä terpeeneistä ainoastaan limoneenille on asetettu HTP-arvo, joka on 8 tunnin altistumiselle $140 \text{mg}/\text{m}^3$ ($140\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja korkeintaan 15 minuutin altistumiselle $280 \text{mg}/\text{m}^3$ (voimaanastumisvuosi 1996).

5.2.4 Alkoholit

1-Butanoli on suurina pitoisuuksina silmiä, ihoa ja hengitysteitä ärsyttävä yhdiste ja voi silmiin joutuessaan vaurioittaa niitä vakavasti. $\text{HTP}_{8\text{h}}$ -arvoa $150 \text{mg}/\text{m}^3$ ($150\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) selvästi korkeammilla pitoisuuksilla se voi myös aiheuttaa uneliaisuutta ja huimausta. 1-Butanolia esiintyi aineistomme mittauskohteissa yleisesti hyvin matalina pitoisuuksina (esiintyvyys 73 %), joilla haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä. Mitattujen pitoisuuksien geometrinen keskiarvo oli $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joka on huomattavasti terveysperusteisia arvoja matalampi: EU-LCI $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RW I $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja RW II $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koko aineiston P90-arvo oli $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mitattu maksimipitoisuus oli $790 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joka ylitti lievästi RW I -arvon, mutta jäi selvästi RW II ja EU-LCI -arvojen alapuolelle. Edellä mainitun 8 tunnin HTP-arvon lisäksi 1-butanolille on 15 minuutin HTP-arvo $230 \text{mg}/\text{m}^3$ ($230\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, voimaanastumisvuosi 1996).

Sisäilmassa esiintyvä 2-Etyyli-1-heksanoli (2-EH) voi aiheuttaa ohimeneviä ihon, silmien ja hengitysteiden ärsytysvaikutuksia. Nämä vaikutukset eivät kuitenkaan ole todennäköisiä 2-EH:n ilmapitoisuuksien ollessa alle sen EU-LCI-arvon $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joka on johdettu perustuen vapaaehtoisilla koehenkilöillä mitattuihin ärsytysvaikutuksiin. Alin pitoisuus, jolla ei havaittu ärsytysvaikutuksia tai muita haitallisia terveysvaikutuksia (NOAEC, No observed adverse effect concentration) on 1,5 ppm ($8,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ eli $8100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Kiesswetter ym. 2005; van Thriel ym. 2007). EU-LCI-arvo on johdettu tästä NOEAC-arvosta, huomioiden altistumisajan pituus (24 h) ja mahdolliset erot koko populaation ja altistumiskokeisiin osallistuneiden terveiden koehenkilöiden välillä. Suomessa 2-EH:lle on asetettu HTP_{8h}-arvo $5,4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($5400 \mu\text{g}/\text{m}^3$; voimaantumisvuosi 2014). Aineistossamme 2-EH:ta esiintyi valtaosassa tutkituista kohteista (64 %), mutta pitoisuustasot jäivät hyvin mataliksi. Niissä kohteissa, joissa yhdistettä esiintyi, sen pitoisuuden geometrinen keskiarvo oli $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koko aineiston P90-arvo oli $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja maksimiarvo $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Edellä mainitun EU-LCI-arvon lisäksi 2-EH:lle on saatavilla alustavat RW-arvot RW I $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja RW II $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. HTP-arvoja ei ole 2-EH:lle.

Propyleeniglykoli eli 1,2-propaanidioli on lievästi silmiä, ihoa ja hengitysteitä ärsyttävä yhdiste. Propyleeniglykolia esiintyi aineistossamme 56 %:ssa mittauskohteista, mittauksen geometrinen keskiarvo oli $2,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tämä on huomattavasti terveysperusteisten raja-arvojen alapuolella: EU-LCI $2100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RW I $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja RW II $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koko aineiston P90-arvo oli $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mitattu maksimipitoisuus $720 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ylitti selvästi RW I -arvon ja lievästi myös RW II -arvon, mutta jäi EU-LCI-arvon alapuolelle. Propyleeniglykolille ei ole HTP-arvoja.

5.2.5 Fenolit

Fenolille altistuminen voi aiheuttaa monenlaisia haitallisia terveysvaikutuksia. Tämä pätee niin kiinteälle fenolille, sen liuokselle kuin korkeille pitoisuuksille ilmassakin. Fenoli imeytyy hengitysteiden ja ruoansulatuskanavan lisäksi myös ihon kautta. Toimistotyypissä työympäristöissä terveyshaittoja aiheuttavat ilman fenolipitoisuudet eivät kuitenkaan ole todennäköisiä. Toistuvan yli $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($40\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pitoisuustasolle altistumisen seurauksena on raportoitu terveyshaittoja ihmisissä. Fenoli on sekä kiinteänä aineena, liuoksena että höyrynä kudoksia ärsyttävä ja suurilla pitoisuuksilla syövyttävä yhdiste. Syövyttävillä pitoisuuksilla fenoli voi aiheuttaa hengitystiealtistumisen seurauksena myös keuhkopöhön. Se voi nieltynä, hengitettynä ja iholle joutuessaan vaikuttaa jo lyhytaikaisenkin altistumisen seurauksena keskushermostoon. Pitkäaikaisessa tai toistuvassa altistumisessa fenoli voi aiheuttaa haittavaikutuksia lisäksi sydämessä, maksassa ja munuaisissa. Tapaturmaisesti hyvin korkeille ainemäärille altistuminen, esimerkiksi teollisuudessa, voi aiheuttaa jopa kuoleman. Lisäksi fenolin on eläinkokeiden perusteella epäilty voivan aiheuttaa perimävaurioita, mutta näyttö on tältä osin heikkoa. Toimistotyypissä

työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla fenolin aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset eivät kuitenkaan ole todennäköisiä.

Fenolia esiintyi matalilla pitoisuuksilla aineistossamme 20 %:ssa mittaushetkillä. Koko aineiston P90-arvo oli $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Niissä kohteissa, joissa fenolia esiintyi, mittausten geometrinen keskiarvo oli $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mitattu maksimipitoisuus oli $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fenolin EU-LCI-arvo on $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RW I -arvo on $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja RW II -arvo on $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fenolin 8 h HTP-arvo on $8 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($8\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja 15 min arvo $16 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($16\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$; voimaantulovuosi 2012).

5.2.6 Alkoholi- ja fenolieetterit

Alkoholi- ja fenolieetterien mahdolliset haitalliset terveysvaikutukset ovat tyypillisesti ärsytysvaikutuksia. Aineistossamme tyypillisimmin esiintyneistä tämän ryhmän yhdisteistä 2-fenoksetanoli (esiintyvyys 22 %) on korkeilla pitoisuuksilla silmille, iholle ja hengityselimille ärsyttävää ja 2-(2-etoksetoksi)etanoli (esiintyvyys 21 %) on lievästi silmiä ärsyttävää. Niissä kohteissa, joissa 2-fenoksetanolia esiintyi, mittausten geometrinen keskiarvo oli $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koko aineiston P90 oli $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja mitattu maksimipitoisuus $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 2-fenoksetanolin EU-LCI-arvo on $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RW I $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja RW II $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Siten tavanomaisilla toimistotyypissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla 2-fenoksetanolin aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä. 2-fenoksetanolin HTP_{8h}-arvo on $110 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($110\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, voimaantulovuosi 2002) ja HTP_{15min} on $290 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($290\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 2-(2-etoksetoksi)etanolin geometrinen keskiarvo oli $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niissä kohteissa, joissa sitä esiintyi. Koko aineiston P90 oli $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja maksimiarvo $730 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 2-(2-etoksetoksi)etanolin EU-LCI-arvo on $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja alustavat RW I ja II arvot ovat $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Siten haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä myöskään 2-(2-etoksetoksi)etanolin tavanomaisilla toimistotyypissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla. 2-(2-etoksetoksi)etanolille ei ole HTP-arvoja.

5.2.7 Aldehydit

Aldehydit ovat tyypillisesti korkeilla pitoisuuksilla silmiä, hengitysteitä ja ihoa ärsyttäviä yhdisteitä. Monet niistä voivat myös aiheuttaa toistuvassa ihokosketuksessa allergista kosketusihottumaa. Aldehydeistä toimistotyypissä työympäristöissä esiintyi tavallisimmin nonanaalia (esiintyvyys 80 %), bentsaldehydiä (78 %), dekanaalia (62 %) ja heksanaalia (56 %). Niiden kaikkien geometriset keskiarvot olivat välillä $1,1\text{--}1,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niissä kohteissa, joissa niitä esiintyi. Koko aineistoon perustuvat P90-arvot olivat välillä $2\text{--}4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nonanaalin maksimipitoisuus oli $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bentsaldehydin $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dekanaalin $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja heksanaalin $310 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Näistä bentsaldehydille ei ole EU-LCI-arvoa, koska v. 2013 oli katsottu, ettei haitallisten terveysvaikutusten arvioimiseksi ole saatavilla riittävä

näyttöä. Muiden kolmen em. aldehydin EU-LCI-arvo on $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bentsaldehydille v. 2010 annettu, alustava RW I arvo on $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja alustava RW II arvo $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Muiden kolmen RW I ja II arvot ovat $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Siten nykytiedon valossa näiden aldehydien aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä tavanomaisilla toimistotyypisissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla. Näistä neljästä aldehydistä ainoastaan bentsaldehydille on HTP-arvot: $\text{HTP}_{8\text{h}}$ $4,4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($4400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, asettamisvuosi 2007) ja kattoarvo $17,4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($17\,400 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Myös VVOC-yhdisteisiin kuuluva formaldehydi on korkeina pitoisuuksina voimakkaasti silmiä ja hengitysteitä ärsyttävä yhdiste. Sen höyryn toistuva tai pitkäaikainen hengittäminen voi aiheuttaa ylähengitysteiden kroonista tulehdusta, lisäksi toistuva tai pitkäaikainen ihokosketus voi aiheuttaa allergista kosketusihottumaa. Formaldehydin tiedetään myös aiheuttavan syöpää, vakuuttavaa näyttöä on eläinkokeista nenänielun syöpien osalta. Syövän mekanismin katsotaan liittyvän korkeisiin formaldehydipitoisuuksiin, joista aiheutuva nenän limakalvon voimakas ärsytys aiheuttaa paikallista kudosaauriota. Lisäksi formaldehydin epäillään aiheuttavan perimävaurioita. Toimistotyypisissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä.

Formaldehydin HTP-arvon on arvioitu suojaavan ärsytysvaikutusten lisäksi myös formaldehydin aiheuttamilta nenänielun syövilta. $\text{HTP}_{8\text{h}}$ -arvo⁶ on $0,37 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($370 \mu\text{g}/\text{m}^3$, voimaantumisvuosi 2020) ja $\text{HTP}_{15\text{min}}$ arvo⁶ on $0,74 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($740 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sekä formaldehydin EU-LCI että RW I -arvo on $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Erillistä RW II -arvoa ei ole. Aineistossamme formaldehydiä esiintyi matalilla pitoisuuksilla 94 %:ssa mittauskohteista. Formaldehydimittauksia tehdään yleensä vain kohteissa, joissa epäillään formaldehydipitoisuuden olevan koholla, joten todennäköisesti esiintyvyys on tavanomaisissa toimistoympäristöissä pienempi. Mitattujen pitoisuuksien geometrinen keskiarvo oli $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kaikkien mittauskohteiden P90-arvo oli $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja maksimiarvo $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

5.2.8 Ketonit

Ketonit ovat tyypillisesti ihoa, silmiä ja hengitysteitä ärsyttäviä yhdisteitä. Jotkin niistä, kuten asetoni ja 2-butanoni, saattavat aiheuttaa korkeilla pitoisuuksilla myös uneliaisuutta ja huimausta. Aineistomme perusteella ainoa yleisesti toimistotyypisissä työympäristöissä esiintyvä ketoni on asetofenoni, jota esiintyi hyvin matalina pitoisuuksina 23 %:ssa mittauskohteista. Niissä kohteissa, joissa asetofenonia esiintyi yli määräysrajan, geometrinen keskiarvo oli $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Myös koko aineiston P90-arvo oli samansuuruinen. Maksimipitoisuus oli $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asetofenonin EU-LCI-arvo on $490 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Haitalliset

⁶ 11.7.2021 alkaen sovelletaan sitovana raja arvona ($0,37 \text{ mg}/\text{m}^3$ eli 0,3 ppm ja $0,74 \text{ mg}/\text{m}^3$ eli 0,6 ppm). Terveystieteiden tutkimuskeskus sovelletaan ajalla 11.7.2021–11.7.2024 sitovaa raja-arvoa 0,5 ppm.

terveysvaikutukset eivät siis ole todennäköisiä tavanomaisilla toimistotyypisissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuustasoilla. RW-arvoja ei ole saatavilla asetofenonille, HTP_{8h}-arvo on 25 mg/m³ (25 000 µg/m³, asettamisvuosi 2005).

5.2.9 Hapot

Hapot ovat tyypillisesti ihoa, silmiä ja hengitysteitä ärsyttäviä tai syövyttäviä aineita. Vaikutuksen vakavuus riippuu kyseessä olevasta haposta sekä sen liuoksen väkevyydestä tai ilmassa olevien happosumujen pitoisuudesta. Orgaaniset, heikot hapot ja matalat happopitoisuudet voivat aiheuttaa lieviä ärsytysvaikutuksia, jotka ovat ohimeneviä altistumisen loppuessa. Epäorgaaniset, vahvat hapot taas voivat esimerkiksi iholle tai silmiin joutuessaan olla jopa syövyttäviä. Myös korkeat ilman epäorgaaniset happosumupitoisuudet voivat olla voimakkaasti ärsyttäviä ja aiheuttaa mm. ärsytysastmaa. Epäorgaaniset happosumut voivat aiheuttaa vakavampia terveyshaittoja esimerkiksi teollisuudessa, missä käsitellään suuria määriä väkeviä epäorgaanisia happoja.

Toimistotyypisissä työympäristöissä esiintyvät hapot ovat orgaanisia, joiden ärsytysvaikutukset voivat olla korkeintaan lieviä. Käytännössä kuitenkin toimistotyypisissä työympäristöissä mitatut pitoisuudet olivat niin pieniä, etteivät edes lievät terveyshaitat ole todennäköisiä. Tavallisin aineistossamme esiintynyt happo oli heksaanihappo, jota esiintyi 39 %:ssa mittauskohteista. Lisäksi propaanihappoa esiintyi 19 %:ssa ja pentaanihappoa 12 %:ssa kohteista. Niissä mittauskohteissa, joissa näitä happoja esiintyi yli määritysrajan, niiden geometriset keskiarvot olivat välillä 1,3–2,6 µg/m³. Koko aineiston P90-arvot olivat välillä 0,6–5 µg/m³. Maksimiarvot olivat välillä 98–330 µg/m³. Kaikki nämä alittivat kunkin hapon EU-LCI-arvon 1500–2100 µg/m³ selvästi. Näille hapoille ei ole saatavilla RW I tai II-arvoja. Ainoastaan propaanihapolle on asetettu HTP-arvo, joka on 8 tunnin altistumiselle 31 mg/m³ (31 000 µg/m³) ja korkeintaan 15 minuutin altistumiselle 61 mg/m³ (voimaantumisvuosi 1998).

5.2.10 Esterit

Estereistä yleisimmin aineistossamme esiintyvät Texanol (2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaanidiolimonoisobutyraatti) ja TXIB (2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaanidiolidi-isobutyraatti). Molempien esiintyvyys oli 23 %.

Texanol on koe-eläimistä saadun tutkimustiedon perusteella lievästi ihoa ja silmiä ärsyttävä, mutta ei ihoa herkistävä eli allergista ihottumaa aiheuttavaa yhdiste (Wibbertmann ym. 2017). Muita ihmisille olennaisia haitallisia terveysvaikutuksia ei havaittu toistetun annostelun oraali-altistuskokeissa korkeillakaan annostasoilla. Saatavilla olevan tutkimusnäytön perusteella ei voida arvioida Texanolin mahdollisia hengitystievaikutuksia. Muutamissa tutkimuksissa on tutkittu VOC-yhdisteiden, mukaanlukien Texanolin, yhteyttä raportoituun hengitystieoireiluun ihmisissä (Choi ym. 2010; Kim ym. 2007; Wieslander ja

Norbäck 2010), mutta syy-seuraussuhdetta ei voitu osoittaa (Wibbertmann ym. 2017). Ihoa ja silmiä ärsyttävät yhdisteet ovat niille hengitysteitse altistuttaessa tyypillisesti myös hengitysteitä ärsyttäviä, joten hengitysteiden ärsytysoireet, erityisesti astmaatikoilla, lienevät mahdollisia. Aineistossamme Texanol-mittausten geometrinen keskiarvo oli $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niissä kohteissa, joissa sitä havaittiin. Koko aineiston P90-arvo oli $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja maksimipitoisuus $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nämä jäävät kaikki Texanolille johdetun EU-LCI-arvon $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alapuolelle, mutta EU-LCI-arvoa ei ole johdettu mahdollisten ärsytysvaikutusten perusteella. RW I, II tai HTP -arvoja ei ole saatavilla. Nykytiedon valossa Texanolin aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä toimistotyypisissä työympäristöissä tavanomaisesti esiintyvillä, hyvin matalilla pitoisuustasoilla.

TXIB ei ole koe-eläimistä saadun tutkimustiedon perusteella ihoa ärsyttävä yhdiste, mutta se voi ärsyttää lievästi silmiä (University of Cincinnati 2018; Wibbertmann ym. 2017). Se ei ole saatavilla olevan tutkimustiedon mukaan ihoa herkistävä yhdiste koe-eläimissä eikä ihmisissä (University of Cincinnati 2018; Wibbertmann ym. 2017). Koe-eläimillä havaittiin viitteitä haitallisesta vaikutuksesta lisääntymisterveyteen muutamassa tutkimuksessa, joissa eläimiä altistettiin oraalisesti ja toistuvasti hyvin korkeilla annoksilla. Näyttö on kuitenkin ristiriitaista, haitallisia vaikutuksia ei havaittu kaikissa tutkimuksissa. Lisäksi kokeissa käytettiin niin suuria annoksia, että mahdolliset vaikutukset eivät ole todennäköisiä ihmisille olennaisilla annostasoilla.

Saatavilla olevan tutkimusnäytön perusteella ei voida arvioida TXIB:n mahdollisia hengitystievaikutuksia. Kahdessa tutkimuksessa tarkasteltiin VOC-yhdisteiden, ml. TXIB:n, yhteyttä raportoituun hengitystieoireiluun ja astmaan ihmisissä (Kim ym. 2007; Villberg ym. 2008), mutta niiden perusteella ei voi vetää syy-seuraussuhdetta (Wibbertmann ym. 2017). Immunologisia vaikutuksia on tutkittu yhdessä eläinkokeessa, jossa käytetty menetelmä ei ole tieteellisesti validoitu, ja tuloksen merkitys ja relevanssi ihmisille ovat epäselviä (Bönisch ym. 2012). Silmiä ärsyttävät yhdisteet ovat niille hengitysteitse altistuttaessa tyypillisesti myös hengitysteitä ärsyttäviä, joten hengitysteiden ärsytysoireet, erityisesti astmaatikoilla, lienevät mahdollisia. TXIB:lle on saatavilla EU-LCI-arvo $1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mutta sitä ei ole johdettu mahdollisten ärsytysvaikutusten perusteella, RW I, II tai HTP-arvoja ei ole. Aineistomme niissä kohteissa, joissa TXIB:tä esiintyi yli määritysrajan, mittausten geometrinen keskiarvo oli $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koko aineiston P90-arvo oli $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja mittattu maksimipitoisuus $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. TXIB:n aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset eivät ole nykytiedon valossa todennäköisiä toimistotyypisissä työympäristöissä tavanomaisesti esiintyvillä, hyvin matalilla pitoisuustasoilla.

5.2.11 Orgaaniset piiyhdisteet

Dekametyyli syklopentasiloksaani ei ole nykytiedon valossa erityisen haitallinen yhdiste, koe-eläimissä ei nähty juurikaan haittavaikutuksia korkeillakaan pitoisuustasoilla

(Dekant ja Klaunig 2016). Muutamien dekametyylisyklopentasiloksaania valmistavien tai maahantuovien yritysten ECHA:alle tekemien rekisteröinti-ilmoitusten mukaan aine saattaa aiheuttaa ihmisille lievää silmien tai ihon ärsytystä. Ärsytysvaikutuksetkaan eivät kuitenkaan ole todennäköisiä toimistotyypissä työympäristöissä esiintyvillä pitoisuuksilla. Dekametyylisyklopentasiloksaania esiintyi valtaosassa aineistomme kohteista (esiintyvyys 72 %). Tavallisimmin pitoisuudet olivat kuitenkin hyvin matalia, geometrinen keskiarvo oli $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tämä jää selvästi saatavilla olevien terveysperusteisten arvojen alapuolelle: RW I $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja RW II $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. EU-LCI-arvon johtaminen on vireillä. Koko aineiston P90-arvo oli $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aineiston maksimiarvo $680 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ylitti RW I -arvon, mutta jäi RW II -arvon alapuolelle. Dekametyylisyklopentasiloksaanille ei ole saatavilla HTP-arvoja.

5.2.12 Kloorianisolit

Kloorianisoliin haju on havaittavissa jo erittäin matalina pitoisuuksina ja se koetaan usein varsin häiritsevänä. Haju myös tarttuu herkästi esimerkiksi tekstiileihin ja esineisiin. Nykytiedon valossa kloorianisolit eivät kuitenkaan ole terveydelle erityisen haitallisia yhdisteitä. Hyvin korkeina pitoisuuksina ne saattavat aiheuttaa lievää ihon, silmien tai hengitysteiden ärsytystä. Ärsytysvaikutukset eivät kuitenkaan ole todennäköisiä kloorianisoliin sisäilmassa esiintyvillä pitoisuuksilla, vaikka haju onkin havaittavissa. Aineistoomme ei sisällynyt kloorianisoliin mittauksia. Niille ei myöskään ole saatavilla RW I, II, EU-LCI tai HTP -arvoja.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sisäympäristöissä esiintyy suuri kirjo erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, jotka ovat peräisin moninaisista rakennuksen sisäisistä ja ulkoisista lähteistä. Työterveyslaitoksen vuosina 2010–2019 analysoiman VOC-aineiston perusteella yleisimmät toimistotyypissä sisäympäristöissä esiintyvät VOC-alueen yhdisteet ovat bentseeni, ksyleenit (p, m), tolueni, α -pineeni, 1-butanoli, 2-etyyli-1-heksanoli, propyleeniglykoli, bentsaldehydi, dekanaali, heksanaali, nonanaali ja dekametyyliisyklopentasiloksaani. Nämä yhdisteet esiintyivät yli 50 %:ssa kymmenen vuoden aikana analysoiduista näytteistä.

Sisäilman yleisimpien yhdisteiden lähteitä ovat mm. liikenne, rakennus- ja sisustusmateriaalit, ihmisen toiminnot, hajusteet ja siivousaineet. Samalla yhdisteellä voi olla useita eri päästölähteitä, eikä siten ole mahdollista osoittaa indikaattoryhdisteitä tietyn materiaalin, kuten muovimattojen, poikkeaville päästöille. Vaikka lähteitä on runsaasti, toimistotyypissä ympäristöissä yhdisteiden pitoisuudet ovat kymmenvuotisen aineistomme perusteella kuitenkin tavanomaisesti varsin pieniä. Myös TVOC-kokonaispitoisuudet ovat tavanomaisesti pieniä, mitä kuvaa TVOC-pitoisuuden mediaani $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja P90-arvo $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Alifaattisten ja aromaattisten hiilivetyjen esiintyvyys on vähentynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana. Määritysrajan ylittävien näytteiden keskimääräisissä pitoisuuksissa ei ole kuitenkaan merkittävää muutosta. Aromaattisia ja alifaattisia hiilivetyjä tulee sisäilmaan pääasiassa liikenteestä ja joistain rakennusmateriaaleista, joiden päästöt ovat viimeisten vuosikymmenien aikana vähentyneet. Alkoholin osalta on havaittavissa siirtymää 2-etyyli-1-heksanolista C_9 -alkoholeihin, mikä selittyy PVC-muovimattojen pehmittimien muuttumisella.

Aldehydien, sisäilmassa yleisimpien happojen, fenolin, alkoholi- ja fenolieettereiden, esteerien sekä piiyhdisteiden (siloksaanit) esiintyvyys on kasvanut viimeisen kymmenen vuoden aikana. Samanaikaisesti näiden yhdisteiden keskimääräiset pitoisuudet määritysrajan ylittävissä näytteissä ovat yleisesti hieman laskeneet. Näiden yhdisteiden esiintyvyyden kasvu johtuu todennäköisesti rakennusmateriaalien muuttumisesta sekä toimistojen tilankäytön tehokkuuden kasvusta. Siloksaanien esiintyvyyden kasvu saattaa liittyä siloksaanien lisääntyneeseen käyttöön hygieniatuotteissa ja antiperspiranteissa (Weschler 2009). Siloksaanit on viime vuosina tunnistettu laajemminkin nousevaksi kemikaaliryhmäksi elinympäristössämme (Fromme ym. 2015; Salthammer 2020; Weschler 2009).

Aineistossamme haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tavanomaiset pitoisuudet jäivät poikkeuksetta huomattavasti terveysperusteisia EU-LCI ja RW -arvotasojen matalammiksi. Siten yksittäisiin haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin liittyvät haitalliset terveysvaikutukset,

mukaan lukien erilaiset ärsytysvaikutukset, ovat nykytiedon valossa epätodennäköisiä toimistotyypissä työympäristöissä. Joissakin kohteissa mitattiin kuitenkin muutamille VOC-yhdisteille maksimiarvoja, jotka ylittivät lievästi näiden yhdisteiden EU-LCI tai RW -arvotason. Koska nämä arvot on johdettu käyttäen korkeita, tyypillisesti ~100–1000-kertaisia turvakertoimia, näillä aineistomme mitatuilla maksimipitoisuuksillakaan ei todennäköisesti esiinny haitallisia terveysvaikutuksia. Yleisesti terveysperusteisten arvojen ylityksessä on silti suositeltavaa tehdä toimenpiteitä päästölähteiden selvittämiseksi ja tarvittaessa päästöjen vähentämiseksi. Käytettäessä terveysperusteisia arvoja mittaustulosten terveydellisen merkityksen tulkintaan, on syytä huomioida ko. arvon tulkintaohje.

Aineistostamme ei analysoitu useiden yhdisteiden samanaikaista esiintyvyyttä mittaustuloksissa, joten yhteisesiintymiseen liittyvien terveysriskien todennäköisyyteen ei voida ottaa kantaa. Yleisellä tasolla aineisto ei kuitenkaan herätä erityistä huolta haihtuvien orgaanisten yhdisteiden yhteisvaikutuksista, koska yhdisteiden pitoisuustasot jäivät pääsääntöisesti huomattavan mataliksi terveysperusteisiin arvoihin verrattuna.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden hajukynnykset voivat olla huomattavastikin terveydelle haitallisia vaikutuksia aiheuttavia pitoisuustasoja matalampia. Viihtyvyyteen vaikuttavia hajuhaittoja voi siis yleisesti esiintyä pitoisuuksilla, joilla haitalliset terveysvaikutukset eivät ole todennäköisiä.

Vaikka VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuudelle (TVOC) on olemassa viitearvoja, TVOC-pitoisuutta ei voida käyttää terveysvaikutusten arvioinnissa ilman tietoa, mistä TVOC-pitoisuus muodostuu. TVOC-pitoisuudelle ei siksi ole mahdollista asettaa terveysperusteista raja-arvoa. TVOC-pitoisuutta voidaan kuitenkin käyttää mittaustulosten nopeaan seulomiseen.

Toimistotyypisten työympäristöjen VOC-yhdisteiden ja formaldehydin alhaisen pitoisuustason ja terveysriskien epätodennäköisyyden perusteella arvioimme, että sisäilmaongelmien taustalla on ei-teollisilla työpaikoilla ainoastaan harvoin syytä epäillä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden aiheuttamia haittoja. Sisäilman VOC-mittaukset eivät siten useinkaan tuo lisäarvoa sisäilmaongelmien ratkaisuisissa. Mittauksia pitää harkita tarkasti kohdekohtaisesti ja tilanteen kokonaisarvioon perustuen. Mittauksella pitää olla tavoite eli kysymys, johon mittauksella pyritään vastaamaan, esimerkiksi jonkin epäillyn tekijän osoittamiseksi tai poissulkemiseksi. Mittauksia suunniteltaessa ja tuloksia tulkittaessa tulee lisäksi huomioida näytteenoton ja analyysimenetelmien rajoitukset. Lisäksi tulee kiinnittää huomiota esimerkiksi siihen, ovatko mitatut pitoisuudet laskettu yhdistekohtaisella vai tolueenin vasteella.

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä voidaan määrittää sisäilmasta keräävillä menetelmillä ja jatkuvatoimisilla mittalaitteilla. Keräävillä menetelmillä otetut näytteet analysoidaan laboratoriossa, ja ainoastaan niillä saatuja tuloksia voidaan arvioida suhteessa erilaisiin ohje-

ja raja-arvoihin. Jatkuvatoimisilla mittalaitteilla saadaan suuntaa antavaa tietoa sisäilman epäpuhtauspitoisuuksista ja pitoisuuksissa tapahtuvista muutoksista. Jatkuvatoimisia mittalaitteita ei voida tällä hetkellä käyttää yksinään sisäilman kemiallisen laadun arviointiin. Niitä ei tule myöskään käyttää terveysvaikutusten arviointiin.

VOC-yhdisteitä voidaan määrittää myös materiaalinäytteistä, mutta materiaalinäytteiden perusteella ei voida saada selville yhdisteiden pitoisuuksia sisäilmassa, joita tarvitaan terveysvaikutusten arvioimisessa. Materiaalinäytetutkimuksia voidaan käyttää esimerkiksi ilmanäytteessä havaittujen yhdisteiden päästölähteiden selvittämisessä. Materiaalinäytteet siis täydentävät tarvittaessa ilmanäytteitä osana sisäilmaselvitystä, mutta pelkkien materiaalinäytteiden perusteella ei tule tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä.

Sisäympäristöjen kemiallinen koostumus muuttuu jatkuvasti uusien teknologioiden ja materiaalikehityksen myötä (Salthammer 2020; Sundell 2017; Weschler 2009). Tämän vuoksi erilaisten yhdisteiden esiintyvyyttä ja pitoisuustasoa olisi hyvä seurata jatkossa esimerkiksi kymmenen vuoden välein.

7 LÄHDELUETTELO

- Abbatt JPD, Wang C (2020) The atmospheric chemistry of indoor environments. *Environmental Science: Processes & Impacts* 22(1):25-48 doi:10.1039/C9EM00386J
- Alhonnoro E (2019) Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden monitorointi sisäilmassa jatkuvatoimisilla mittalaitteilla. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 76 s.
- Alapieti T (2016) Puumateriaalien vaikutukset mitattuun ja koettuun sisäympäristöön sekä ilmanvaihdon merkitys sisäilman laadulle puurakenteisissa koerakennuksissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennustekniikan laitos. Espoo. 94 s.
- Alapieti T, Alhonnoro E, Mikkola R ja Salonen H (2020) Jatkuvatoimisten mittalaitteiden luotettavuus sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuksien mittaamisessa. *SIY Raportti* 38. s. 45–50.
- Baloch RM, Maesano CN, Christoffersen J, ym. (2020) Indoor air pollution, physical and comfort parameters related to schoolchildren's health: Data from the European SINPHONIE study. *Science of The Total Environment* 739:139870 doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139870>
- Bönisch U, Böhme A, Kohajda T, ym. (2012) Volatile organic compounds enhance allergic airway inflammation in an experimental mouse model. *PLoS One* 7(7):e39817 doi:10.1371/journal.pone.0039817
- Choi H, Schmidbauer N, Sundell J, Hasselgren M, Spengler J, Bornehag CG (2010) Common household chemicals and the allergy risks in pre-school age children. *PLoS One* 5(10):e13423 doi:10.1371/journal.pone.0013423
- Dekant W, Klaunig JE (2016) Toxicology of decamethylcyclopentasiloxane (D5). *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 74:S67-S76 doi:<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.06.011>
- ECHA (2020, päivitetty). C&L-luettelon tietokanta. Saatavilla: <http://echa.europa.eu/fi/information-on-chemicals/cl-inventory-database>
- Edwards RD, Jurvelin J, Koistinen K, Saarela K, Jantunen M (2001) VOC source identification from personal and residential indoor, outdoor and workplace microenvironment samples in EXPOLIS-Helsinki, Finland. *Atmospheric Environment* 35(28):4829-4841 doi:[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00271-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00271-0)
- EU-LCI Working Group, (2019a, päivitetty). Saatavilla: https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values_en
- EU-LCI Working Group, (2019b, päivitetty). Documents and Glossary: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/30861> ja <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/39983>
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/42/EY, annettu 21. päivänä huhtikuuta 2004, orgaanisten liuottimien käytöstä tietyissä maaleissa ja lakoissa sekä ajoneuvojen korjausmaalaustuotteissa aiheutuvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöjen rajoittamisesta ja direktiivin 1999/13/EY muuttamisesta. Voimassa. Viimeisin konsolidoitu versio 26/07/2019. Saatavilla: <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/42/oj>

- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU, annettu 24. päivänä marraskuuta 2010, teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen). Voimassa. Viimeisin konsolidoitu versio 06/01/2011. Saatavilla: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>
- Fromme H, Cequier E, Kim J-T, ym. (2015) Persistent and emerging pollutants in the blood of German adults: Occurrence of dechloranes, polychlorinated naphthalenes, and siloxanes. *Environment International* 85:292-298
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.002>
- Gallon V, Le Cann P, Sanchez M, Dematteo C, Le Bot B (2020) Emissions of VOCs, SVOCs, and mold during the construction process: Contribution to indoor air quality and future occupants' exposure. *Indoor Air* doi:10.1111/ina.12647
- Geiss O, Giannopoulos G, Tirendi S, Barrero-Moreno J, Larsen BR, Kotzias D (2011) The AIRMEX study - VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *Atmospheric Environment* 45(22):3676-3684 doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.037>
- Greenberg MI, Curtis JA, Vearrier D (2013) The perception of odor is not a surrogate marker for chemical exposure: a review of factors influencing human odor perception. *Clin Toxicol (Phila)* 51(2):70-6 doi:10.3109/15563650.2013.767908
- IARC (2018). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 120, Benzene. Saatavilla: <http://publications.iarc.fr/576>
- IARC (2020, päivitetty). IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. Saatavilla: <https://monographs.iarc.who.int/monographs-available/>
- ILO (2020, päivitetty). ICSC-tietokanta. Kansainväliset kemikaalikortit. Saatavilla: https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS_324858/lang--en/index.htm
- ISO 16017-2 (2003) Indoor, ambient and workplace air – Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography – Part 2: Diffusive sampling.
- ISO 16000-3 (2011) Indoor air – Part 3 Determination of formaldehyde and other carbonyl compounds in indoor air and test chamber air– Active sampling method.
- ISO 16000-6 (2011) Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax®TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS-FID.
- Kiesswetter E, Thriel C, Schäper M, Blaszkewicz M, Seeber A (2005) Eye blinks as indicator for sensory irritation during constant and peak exposures to 2-ethylhexanol. *Environ Toxicol Pharmacol* 19(3):531-41 doi:10.1016/j.etap.2004.12.056
- Kim JL, Elfman L, Mi Y, Wieslander G, Smedje G, Norbäck D (2007) Indoor molds, bacteria, microbial volatile organic compounds and plasticizers in schools--associations with asthma and respiratory symptoms in pupils. *Indoor Air* 17(2):153-63
doi:10.1111/j.1600-0668.2006.00466.x
- Leino K, Hovi H ja Parshintsev E (2020) Kuinka arvioida materiaaliemissioiden vaikutusta sisäilman kemialliseen laatuun? SIY Raportti 38. s. 69–76.
- Lucattini L, Poma G, Covaci A, de Boer J, Lamoree MH, Leonards PEG (2018) A review of semi-volatile organic compounds (SVOCs) in the indoor environment: occurrence in consumer products, indoor air and dust. *Chemosphere* 201:466-482
doi:10.1016/j.chemosphere.2018.02.161

- Mandin C, Trantallidi M, Cattaneo A, ym. (2017) Assessment of indoor air quality in office buildings across Europe - The OFFICAIR study. *Sci Total Environ* 579:169-178 doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.238
- NT build 484 (1998) Building materials: Emission of volatile compounds – On-site measurements with Field and Laboratory Emission Cell (FLEC). Nordtest.
- Paciencia I, Madureira J, Rufo J, Moreira A, Fernandes Ede O (2016) A systematic review of evidence and implications of spatial and seasonal variations of volatile organic compounds (VOC) in indoor human environments. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 19(2):47-64 doi:10.1080/10937404.2015.1134371
- RAC (2018) ANNEX 1 Background document in support of the Committee for Risk Assessment (RAC) evaluation of limit values for benzene in the workplace. Saatavilla: <https://echa.europa.eu/documents/10162/37b38de4-0e36-6058-eea4-1ffc56938831>
- Rakennustietosäätiö RTS sr (2018) RT 07-11297. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset.
- Rakennustietosäätiö RTS sr (2020) Rakennusmateriaalien päästöluokitus M1. Saatavilla 8.12.2020: <https://cer.rts.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus-m1/>
- Salonen HJ, Pasanen AL, Lappalainen SK, Riuttala HM, Tuomi TM, Pasanen PO, Bäck BC ja Reijula KE (2009) Airborne concentrations of volatile organic compounds, formaldehyde and ammonia in Finnish office buildings with suspected indoor air problems. *J Occup Environ Hyg*. 2009 Mar;6(3): 200-9.
- Salthammer T (2016) Very volatile organic compounds: an understudied class of indoor air pollutants. *Indoor Air* 26(1):25-38 doi:10.1111/ina.12173
- Salthammer T (2020) Emerging indoor pollutants. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 224:113423 doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113423>
- Sarigiannis DA, Karakitsios SP, Gotti A, Liakos IL, Katsoyiannis A (2011) Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk. *Environment International* 37(4):743-765 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.01.005>
- SCOEL (1991) Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for benzene SCOEL/SUM/140. Saatavilla: <http://ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=7423&langId=en>
- SFS-EN ISO 16000-9 (2006) Indoor air. Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing. Emission test chamber method. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN ISO 16000-10 (2006) Indoor air. Part 10: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing. Emission test cell method. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 16516 (2017) Construction products: Assessment of release of dangerous substances. Determination of emissions into indoor air. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- Spinazze A, Campagnolo D, Cattaneo A, ym. (2020) Indoor gaseous air pollutants determinants in office buildings-The OFFICAIR project. *Indoor Air* 30(1):76-87 doi:10.1111/ina.12609
- STM (2020). HTP-arvot 2020. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-00-5658-2>
- Sundell J (2017) Reflections on the history of indoor air science, focusing on the last 50 years. *Indoor Air* 27(4):708-724 doi:<https://doi.org/10.1111/ina.12368>

- Työsuojeluhallinto (2020, päivitetty) HTP-arvojen perustelumuiot. Saatavilla: <https://www.tyosuojelu.fi/tyoolot/kemialliset-tekijat/raja-arvot/perustelumuiot>
- Työterveyslaitos (2012) Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden (TVOC) tavoitetasot teollisten työympäristöjen yleisilmassa. TY-01-2012. Saatavilla 4.1.2021: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/TVOC-tavoitetasot.pdf>
- Työterveyslaitos (2013) Ammattisyöpätyöryhmän muistio 2013. Saatavilla: http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/114575/Ammattisyopatyoryhman_muistio_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Työterveyslaitos (2016, päivitetty). PAH-yhdisteiden tavoitetasoperustelumuiot. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2019/01/pah-yhdisteet-tavoitetaso.pdf> (haettu 27.1.2020)
- Työterveyslaitos (2019) Kooste epäpuhtaustasoista, joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-ongelmiin toimistotyypisillä työpaikoilla. Saatavilla 6.4.2020: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/09/sisaympariston-viitearvoja.pdf>
- Työterveyslaitos (2020, päivitetty). Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet -turvallisuusohjeet (OVA-ohjeet). Saatavilla: <https://www.ttl.fi/ova/>
- Umweltbundesamt (2020, päivitetty). German Committee on Indoor Guide Values. Saatavilla: <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-guide-values#guide-values-i-and-ii> (haettu 4.12.2020)
- University of Cincinnati (2018) Toxicity Review for 2,2,4-Trimethyl-1,3-Pentanediol-Diisobutyrate (TPIB). Saatavilla: <https://www.cpsc.gov/s3fs-public/Toxicity%20Review%20of%20TPIB.pdf?ZhLultr91ZS55XL9DXmc4TmLwSu0osaf> (haettu 1.12.2020).
- Vaittinen O ja Hieta T (2018) Sisäilman formaldehydin jatkuvatoiminen mittaaminen kenttäolosuhteissa. SIY Raportti 36. s. 407–412.
- Valvira (2016) Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa III. Dnro 2731/06.10.01/2016. Saatavilla 8.12.2020: <https://www.valvira.fi/-/asumisterveysasetuksen-soveltamisohje>
- van Thriel C, Kiesswetter E, Schaper M, ym. (2007) From neurotoxic to chemosensory effects: new insights on acute solvent neurotoxicity exemplified by acute effects of 2-ethylhexanol. *Neurotoxicology* 28(2):347-55 doi:10.1016/j.neuro.2006.03.008
- Wei G-L, Li D-Q, Zhuo M-N, et al. (2015) Organophosphorus flame retardants and plasticizers: Sources, occurrence, toxicity and human exposure. *Environmental Pollution* 196:29-46 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.09.012>
- Wei W, Mandin C, Ramalho O (2018) Influence of indoor environmental factors on mass transfer parameters and concentrations of semi-volatile organic compounds. *Chemosphere* 195:223-235 doi:10.1016/j.chemosphere.2017.12.072
- Weschler CJ (2009) Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmospheric Environment* 43(1):153-169 doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.044>
- WHO (1989) Indoor air quality: organic pollutants. Euro Reports and Studies No. 111. Kööpenhamina. WHO Regional Office for Europe.
- WHO (2010) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. Saatavilla: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf
- Wibbertmann A, Wahnschaffe U, Wiedemeier P (2017) TEXTE 32/2017. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3715 61 288 OUBA-FB 002401. Toxikologische

Basisdaten und Textentwürfe für die Ableitung eines EU-LCI-Wertes für 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol monoisobutyraat, 2,2,4-Trimethylpentandiol diisobutyraat, 2-Methyl-1-propanol, 2-Phenoxyethanol, Isopropylbenzol. Saatavilla: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24_texte_32-2017_toxikologische-basisdaten.pdf (haettu 1.12.2020).

- Wieslander G, Norbäck D (2010) Ocular symptoms, tear film stability, nasal patency, and biomarkers in nasal lavage in indoor painters in relation to emissions from water-based paint. *Int Arch Occup Environ Health* 83(7):733-41 doi:10.1007/s00420-010-0552-0
- Villberg K, Mussalo-Rauhamaa H, Haahtela T, Saarela K (2008) Prevalence of Plastic Additives in Indoor Air related to Newly Diagnosed Asthma. *Indoor and Built Environment* 17(5):455-459 doi:10.1177/1420326x08096413
- Zhong L, Su FC, Batterman S (2017) Volatile Organic Compounds (VOCs) in Conventional and High Performance School Buildings in the U.S. *Int J Environ Res Public Health* 14(1) doi:10.3390/ijerph14010100