



## Dieselpakokaasujen tavoitetasoperustelumuistio

## Otsikko

## Sisällysluettelo

|  |    |
|--|----|
| 1 Fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet.....                                | 3  |
| 2 Vertailu- ja raja-arvoja eri maissa .....                                    | 4  |
| 3 Altistuminen.....  | 5  |
| 3.1 Altistumistasot suomalaisilla työpaikoilla .....                           | 5  |
| 3.2 Muut altistumistutkimukset työympäristössä.....                            | 6  |
| 3.3 Ei-työperäinen altistuminen.....   | 7  |
| 3.4 Yhteenveto altistumistiedoista.....  | 8  |
| 4 Altistumisen hallintakeinot .....  | 8  |
| 5 Terveysvaikutukset .....   | 10 |
| 5.1 Kulkeutuminen elimistöön, aineenvaihdunta ja poistuminen elimistöstä ..... | 10 |
| 5.2 Lyhytaikaisen altistumisen vaikutukset .....                               | 10 |
| 5.3 Pitkäaikaisen altistumisen vaikutukset .....                               | 11 |
| 6 Ehdotus dieselpakokaasujen tavoitetasoksi .....                              | 12 |
| 7 Kirjallisuus.....  | 13 |

## YHTEENVETO

### Ehdotetut ohjearvot ja tavoitetasot ilmapitoisuuksille

| Yleinen työperäinen altistuminen                       |                                    |  |
|--|------------------------------------|--|
| Lakisääteinen taso                                     |                                    |  |
| Typpidioksidi, HTP (8 h)                               | 3 ppm (5,7 mg/m <sup>3</sup> )     |  |
| Typpidioksidi, HTP (15 min)                            | 6 ppm (11 mg/m <sup>3</sup> )      |  |
| Dieselnoki, vertailupitoisuus (Sveitsin ohjearvo, 8 h) | 100 µg/m <sup>3</sup> *            |  |
| Tavoitetaso  | Yleinen työperäinen altistuminen ‡ | Kaivokset ja maanalaiset rakennustyömaat |
| Dieselnoki (8 h)                                       | 5 µg/m <sup>3</sup> *              | 20 µg/m <sup>3</sup> *                   |
| Typpidioksidi (15 min)                                 | 0,2 ppm (0,4 mg/m <sup>3</sup> )   | 0,5 ppm (1,0 mg/m <sup>3</sup> )         |

‡ Varastot, korjaamot, terminaalit ja vastaavat tilat sekä maanpäälliset rakennustyömaat ja muut ulkotyöt.

\* Alkuainehiili, alveolijae (µg EC/m<sup>3</sup>).

## 1 Fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet

Dieselpakokaasu on monimutkainen seos, jonka kaasu- ja hiukkasfaasi sisältävät tuhansia yhdisteitä. Pakokaasun koostumukseen vaikuttavat moottorin tyyppi, rakenne, tekniikka ja kunto, moottorin käyttötila, mahdolliset suodattimet ja katalysaattorit sekä polttoaineen koostumus (Ulfarson 1999). Samankin moottorin tuottaman pakokaasun koostumus voi vaihdella huomattavasti moottorin käyttötilasta riippuen.

Dieselpakokaasun kaasufaasin pääkomponentit ovat hiilidioksidi, happi, typpi, vesihöyry, typen oksidit ja hiilimonoksidi (US EPA 2002; McDonald ym. 2004). Pääkomponentit kattavat yli 99 % kaasufaasin massasta. Kaasufaasi sisältää lisäksi rikin oksideita sekä lukuisia hiilivetyjä, joista tunnetusti terveydelle haitallisia ovat esimerkiksi aldehydit (mm. formaldehydi, asetialdehydi ja akryylialdehydi) sekä polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH-yhdisteet).

Dieselmoottorissa muodostuvat primääriset pakokaasuhiukkaset koostuvat pääasiassa alkuainehiiltä sisältävästä ytimestä, jonka pinnalle adsorboituu raskaampia hiilivetyjä, esimerkiksi pitkäketjuisia aldehydejä, karboksyylihappoja, PAH-yhdisteitä ja PAH-yhdisteiden johdannaisia. Primäärihiukkasten lisäksi pakokaasu sisältää ultrapieniä sekundaarisia hiukkasia, jotka muodostuvat kaasufaasiyhdisteiden hapettuessa ja kondensoituaessa.

Jälkikäsittelemättömässä dieselpakokaasussa alkuainehiilen (EC) osuus hiukkasten kokonaisuudesta on noin 50–75 % ja orgaanisiin yhdisteisiin sitoutuneen (OC) hiilen noin 20–35 % (US EPA 2002). PAH-yhdisteet muodostavat <1 % hiukkasmassasta. Hiukkaset sisältävät lisäksi pieniä määriä sulfaatteja, nitraatteja ja metalleja.

Dieselmoottorien, pakokaasun jälkikäsitteilytekniikoiden ja polttoaineiden kehittyminen on muuttanut dieselpakokaasujen koostumusta viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana (McClellan ym. 2012). Erityisesti uusimmilla, hiukkassuodattimilla ja hapetuskatalysaattoreilla varustetuilla dieselajoneuvoilla ja -työkoneilla pakokaasun koostumus poikkeaa merkittävästi aikaisemmasta. Keskeisin muutos on dieselpakokaasuhiukkasten massapitoisuuden ja alkuainehiilen osuuden merkittävä väheneminen (McClellan ym. 2012; Hesterberg ym. 2012; Khalek ym. 2011). Myös orgaanisten yhdisteiden ja typen oksidien (NO<sub>x</sub>) emissio on uusilla moottori- ja jälkikäsitteilytekniikoilla merkittävästi vähäisempää (Liu ym. 2010; McDonald ym. 2012). Typpidioksidin (NO<sub>2</sub>) osuus typen oksideista voi kuitenkin olla korkeampi kuin vanhemmilla moottorityypeillä.

## 2 Vertailu- ja raja-arvoja eri maissa

Dieselpakokaasuille on annettu työhygieenisiä (ohje)raja-arvoja vain muutamissa maissa (Taulukko 1). Suomessa ei ole annettu (ohje)raja-arvoja (esim. HTP-arvot) dieselpakokaasuille. Sveitsissä dieselpakokaasujen työhygieeninen ohjeraja-arvo on 100 µg EC/m<sup>3</sup> alveolijakeen hiukkasten alkuainehiilenä (Suva 2014). Tätä ohjeraja-arvoa on käytetty epävirallisena vertailuarvona myös Suomessa. Itävallan tekniset raja-arvot dieselpakokaasuille on annettu alveolijakeen hiukkasina, erikseen maanalaisiin (300 µg/m<sup>3</sup>) ja muihin töihin (100 µg/m<sup>3</sup>) (BASK 2011). Yhdysvalloissa kaivostyöhön on annettu raja-arvo 160 µg TC/m<sup>3</sup> pakokaasuhiukkasten kokonaishiilenä (MSHA 2013).

Ruotsissa diesel- ja bensiinipakokaasuille on asetettu kahdeksan tunnin työhygieeninen raja-arvo typpidioksidina (1 ppm NO<sub>2</sub>) ja hiilimonoksidina (20 ppm CO) (Arbetsmiljöverket 2011). Erityisesti typpidioksidia pidetään soveltuvana indikaattorina dieselpakokaasuille. Raja-arvojen perustelumuistiossa esitetään ärsytys- ja tulehdusvaikutukset hengitysteissä dieselpakokaasujen kriittisenä vaikutuksena, mutta työperäisen dieselpakokaasualtistumisen todetaan voivan lisätä myös keuhkosityöpärisiä (Montelius 2003).

Iso-Britanniassa dieselpakokaasuille ei ole annettu työhygieenisiä raja-arvoja, mutta Health and Safety Executive (HSE) on suositellut, että hiilidioksidin pitoisuus dieselpakokaasuille altistuttaessa alittaa 1000 ppm (HSE 1999). Muita alhaisen altistumistason indikaattoreita HSE:n mukaan ovat kirkas ilma, noettomat pinnat ja se, että työntekijät eivät koe silmien tai hengitysteiden ärsytystä.

Taulukko 1. Työhygieenisiä (ohje)raja-arvoja dieselpakokaasuille eri maissa.

|          | Hiukkaset,<br>alveolijae<br>(µg/m <sup>3</sup> );<br>8h | Hiukkaset,<br>alveolijae<br>(µg/m <sup>3</sup> );<br>15 min | EC,<br>alveolijae<br>(µg/m <sup>3</sup> );<br>8h | TC<br>(µg/m <sup>3</sup> );<br>8h | NO <sub>2</sub><br>(ppm);<br>8h | CO<br>(ppm);<br>8h |
|----------|---|---|--|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Itävalta | 100;<br>300 <sup>1</sup>                                | 400; 1200 <sup>1</sup>                                      | -  | -                                 | -                               | -                  |
| Ruotsi   | -   | -   | -  | -                                 | 1                               | 20                 |
| Sveitsi  | -   | -   | 100  | -                                 | -                               | -                  |
| USA      | -   | -   | -  | 160 <sup>1</sup>                  | -                               | -                  |

<sup>1</sup> Maanalaisessa kaivostyössä. EC: Alkuainehiili. CO: Hiilimonoksidi. MSHA: Mine Safety and Health Administration. NO<sub>2</sub>: Typpidioksidi. TC: Kokonaishiili.

### 3 Altistuminen

#### 3.1 Altistumistasot suomalaisilla työpaikoilla

Taulukkoon 2 on koottu dieselpakokaasun indikaattorina käytetyn pakokaasuhiukkasten sisältämän alkuainehiilen (ns. dieselnoki) mittaustulokset Työterveyslaitoksen työhygieenisten mittausten rekisteristä vuosilta 2008–2015 (TTL 2015a). Maanalaisia kaivoksia koskeviin tuloksiin on sisällytetty myös Työterveyslaitoksen vuonna 2014 *Hiukkaset ja melu kestävässä kaivosympäristössä* -tutkimushankkeessa toteuttamien mittausten tulokset (TTL 2015b).

Varastoissa, tuotantohalleissa ja vastaavissa maanpäällisissä sisätiloissa, joissa on dieselajoneuvoliikennettä, dieselnoken pitoisuus oli selvästi alhaisempi (mediaani 10 µg EC/m<sup>3</sup>; keskiarvo 40 µg EC/m<sup>3</sup>; n=45) kuin maanalaisissa kaivoksissa ja tunnelityömailla (mediaani µg 58 EC/m<sup>3</sup>; keskiarvo 105 µg EC/m<sup>3</sup>; n=45). Kaivoksissa ja tunnelityömailla korkeita pitoisuuksia mitattiin myös työkoneiden hyteissä (mediaani 43 µg EC/m<sup>3</sup>; keskiarvo 63; n=13) (TTL 2015a,b).

Taulukko 2. Dieselnoki (alkuainehiili, alveolijae) Työterveyslaitoksen vuosina 2008–2015 toteuttamissa mittauksissa (TTL 2015a,b).

|   | Kaikki näytteet |                                   |                                  |   | Hengitysvyöhykenäytteet |                                   |                                  |   |
|---|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---|
|   | luku-<br>määrä  | keskiarvo<br>(µg/m <sup>3</sup> ) | mediaani<br>(µg/m <sup>3</sup> ) | vaihtelu-<br>väli<br>(µg/m <sup>3</sup> ) | luku-<br>määrä          | keskiarvo<br>(µg/m <sup>3</sup> ) | mediaani<br>(µg/m <sup>3</sup> ) | vaihtelu-<br>väli<br>(µg/m <sup>3</sup> ) |
| Varastot,<br>tuotantotilat<br>yms.                  | 45              | 40                                | 10                               | 0,5–505                                   | 10                      | 14                                | 12                               | 1,5–38                                    |
| Maanalaiset<br>kaivokset ja<br>rakennus-<br>työmaat | 45              | 105                               | 58                               | 0,5–<br>1090                              | 6                       | 107                               | 62                               | 58–228                                    |

Dieselnoken lisäksi työpaikoilla on mitattu pakokaasujen sisältämiä typen oksideita ja hiilimonoksidia, ja muutamissa mittauksissa lisäksi aldehydejä ja PAH-yhdisteitä. 2000-luvulla tehdyissä mittauksissa typpidioksidin pitoisuus varastoissa, terminaaleissa ja vastaavissa kohteissa tehdyissä mittauksissa oli <0,1–0,9 ppm NO<sub>2</sub> (TTL 2009). Korkeimmat pitoisuudet (≤3,1 ppm NO<sub>2</sub>) mitattiin pilaantuneen maan telttakaivussa. Hiilimonoksidipitoisuudet vaihtelivat mittauksissa välillä <1–6,5 ppm CO. Aldehydeistä akroleiinin ja formaldehydin suurimmat mitatut pitoisuudet olivat 0,009 mg/m<sup>3</sup> ja 0,082 mg/m<sup>3</sup>. PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat pieniä; esimerkiksi bentso(a)pyreenin suurin mitattu pitoisuus oli 0,08 µg/m<sup>3</sup> ja naftaleenin 3 µg/m<sup>3</sup>.

*Hiukkaset ja melu kestävässä kaivosympäristössä* -tutkimushankkeessa dieselpakokaasujen sisältämän typenoksidien keskipitoisuus kaivostunnelissa kaksi vuorokautta kestäneessä jatkuvatoimisessa mittauksessa oli 1,5 (0,7–2,5) ppm NO ja 0,2 (0–0,5) ppm NO<sub>2</sub> (TTL 2015b). PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat hyvin pieniä; bentso(a)pyreenin ja muiden 4-6-renkaisten PAH-yhdisteiden pitoisuus jäi kaikissa mittauksissa alle määräysrajan (<0,004 µg/m<sup>3</sup>). Naftaleenin pitoisuus vaihteli välillä 0,34–1,7 µg/m<sup>3</sup>.

### 3.2 Muut altistumistutkimukset työympäristössä

Yhdysvalloissa vuosina 1998–2001 toteutetussa laajassa dieselpakokaasualtistumista kaivosympäristöissä selvittäneessä hankkeessa maanalaisista kaivostyötä tekevien työntekijöiden keskimääräinen altistumistaso dieselnoelle vaihteli välillä 31–488  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (alveolijae), ja maanpäällisillä alueilla työskentelevillä välillä 2–6  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (Coble ym. 2010). Keskimääräinen altistumistaso typen oksideille oli 0,2–1,5 ppm NO ja 0,1–0,6 ppm NO<sub>2</sub> maanalaisessa kaivostyössä ja 0,02–0,1 ppm NO ja 0,01–0,06 ppm NO<sub>2</sub> maan pinnalla. Toisessa laajassa yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa keskimääräiset altistumistasot maanalaisissa kaivoksissa vaihtelivat välillä 41–405  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (alveolijae) ja maanpäällisissä välillä 1–39  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (Cohen ym. 2002). Aikaisemmissa tutkimuksissa maanalaisissa kaivoksissa on raportoitu keskimääräisiä altistumistasoja 27–637  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (alveolijae), 2–9 ppm CO, 0,7–15 ppm NO ja 0,2–5,5 ppm NO<sub>2</sub> (Pronk ym. 2009). Dieselkoneiden kertakäyttöisten hiukkassuodattimien todettiin yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa vähentävän altistumista pakokaasuhiukkasille kaivoksissa parhaimmillaan 95 % (Haney ym. 1997).

Ruotsissa ja Norjassa vuosina 1996–2004 toteutetuissa tutkimuksissa tunnelityömailla työskentelevien altistumistasot vaihtelevat välillä 132–314  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (hengittyvä jae), 5–9 ppm CO, 2,6 ppm NO ja 0,2–0,9 ppm NO<sub>2</sub> (Ulfvarson ym. 1991; Bakke ym. 2001; Lewne ym. 2007). Norjassa vuonna 2010–2011 toteutetussa tutkimuksessa keskimääräiset altistumistasot olivat matalampia: 56  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (hengittyvä jae) ja 0,09 ppm NO<sub>2</sub> (Bakke ym. 2014). Maanpäällisillä rakennustyömailla keskimääräiset altistumistasot ovat olleet luokkaa 4–13  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (alveolijae), 1 ppm CO, 0,2 ppm NO ja 0,02–0,3 ppm NO<sub>2</sub> (Pronk ym. 2009).

Wheatley ja Sadhra (2004) selvittivät varastotyöntekijöiden altistumista dieselpakokaasuille yhdeksässä trukkivarastossa Englannissa. Trukit olivat samaa mallia ja otettu käyttöön vuosina 1997–1998. Varastoissa ei ollut koneellista ilmanvaihtoa. Dieselnoen keskipitoisuus varastohalleissa oli 7–55  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (alveolijae). Hiilimonoksidin keskipitoisuus työpäivän aikana vaihteli välillä <1–2 ppm CO. PAH-yhdisteiden keskipitoisuus kokonaispölyssä oli 6,2–19 ng/m<sup>3</sup>. Kaikkien hiukkasfaasin komponenttien pitoisuudet korreloivat hyvin keskenään. Yhdysvalloissa tehdyssä selvityksessä dieselnoen geometrinen keskipitoisuus työpäivän aikana kahdella lastauslaiturilla työskentelevien dieseltrukkien kuljettajien hengitysvyöhykkeellä oli 23  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  ja 55  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (Cantrell ja Watts 1997). Trukkeihin asennetut hiukkassuodattimet ensimmäisellä lastauslaiturilla vähensivät alkuainehiilen pitoisuutta 92 % (tasolle 1,9  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$ ).

Kanadalaisessa tutkimuksessa, jossa mitattiin työntekijöiden altistumista dieselpakokaasuille 17:ssä bussi-, rekka- ja veturikorjaamossa, dieselnoen geometrinen keskipitoisuus työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä ja kiinteistä mittauspisteistä mitatuissa näytteissä oli 14  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$ , 5,9  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  ja 2,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Seshagiri 2003). Bussikorjaamoissa liikenne oli vilkasta, mutta käytössä oli sekä paikallispoisto että yleisilmanvaihto. Rekka- ja veturikorjaamoissa liikenne oli hyvin vähäistä. Muissa varastoissa ja terminaaleissa tehdyissä tutkimuksissa keskimääräiset altistumistasot dieselpakokaasuille ovat olleet luokkaa 4–122  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$ , 2–5 ppm CO, 0,1 ppm NO, ja 0,1 ppm NO<sub>2</sub> ja autokorjaamoissa noin 4–39  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  ja 0,05–0,2 ppm NO<sub>2</sub> (Pronk ym. 2009).

Laajassa Yhdysvalloissa vuosina 2001–2005 toteutetussa kuorma-autonkuljettajien dieselpakokaasualtistumista selvittäneessä tutkimuksessa keskipitoisuudet kuorma-autojen hyteissä vaihtelevat välillä 1,1–1,6  $\mu\text{g EC}/\text{m}^3$  (Davis ym. 2007). Vanhemmilla moottoreilla varustetuissa autoissa pitoisuus hytissä oli korkeampi kuin uudemmilla. Aikaisemmissa tutkimuksissa pitoisuudet

kuorma-autojen hyteissä ovat olleet luokkaa 5–22 µg EC/m<sup>3</sup>, 0.3 ppm NO ja 0,04 ppm NO<sub>2</sub> (Pronk ym. 2009).

Ruotsissa vuosina 2002–2004 tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin useiden pakokaasuille työssään altistuvien ammattiryhmien altistumistasoja (Lewne ym. 2007). Keskimääräiset pitoisuudet työpäivän aikana on esitetty taulukossa 3. Hiilimonoksidia ei mitattu, koska CO-pitoisuuksien katalysaattorimoottorien pakokaasuissa tiedetään olevan alhaisia, eikä henkilökohtaiseen mittaukseen soveltuvaa riittävän herkkää menetelmää ollut käytettävissä. Tunnelityömaalla ja autohalleissa kaikkien mitattujen komponenttien pitoisuudet korreloivat melko hyvin keskenään ( $r = 0,44–0,89$ ;  $p < 0,05$ ). Typenoksidien korrelaatio oli hyvä erityisesti alle 1 µm hiukkasten (PM<sub>1</sub>) ja alkuainehiilen (hengittyvä jae) kanssa ( $r = 0,66–0,76$ ;  $p < 0,01$ ).

Taulukko 3. Keskimääräinen hengitysvyöhykepitoisuus työpäivän aikana (Lewne ym. 2007).

|   | Työnteki-<br>joiden<br>määrä | PM <sub>2.5</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> )<br><i>n=63</i> | PM <sub>1</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> )<br><i>n=64</i> | EC<br>(µg/m <sup>3</sup> )<br><i>n= 69</i> | OC<br>(µg/m <sup>3</sup> )<br><i>n=69</i> | NO <sub>2</sub><br>(ppm)<br><i>n=168</i> |
|---|------------------------------|--|--|--|---|--|
| Tunnelityömaa<br>(diesel)                             | 6                            | 231  | 119  | 87   | 104                                       | 0,19                                     |
| Bussi/rekkahalli, mekaanikot<br>(diesel)              | 20                           | 42   | 23   | 11   | 13  | 0,05                                     |
| Henkilöautohalli, mekaanikot<br>(pääasiassa bensiini) | 8                            | 70   | 23   | 12   | 18  | 0,02                                     |
| Rakennustyömaa,<br>koneenkuljettajat (diesel)         | 11                           | 26   | 28   | 7,8  | 12  | 0,02                                     |
| Muut ulkotyöntekijät<br>(diesel)                      | 12                           | 26   | 21   | 4,1  | 5,4                                       | 0,02                                     |
| Bussi- ja rekkakuskit<br>(pääasiassa diesel)          | 10                           | 16   | 14   | 6,4  | 11  | 0,03                                     |
| Taksinkuljettajat<br>(pääasiassa diesel)              | 4                            | 17   | 11   | 6,7  | 9,3                                       | 0,02                                     |

EC: Alkuainehiili (hengittyvä jae). NO<sub>2</sub>: Typpidioksidi. OC: Hiilimonoksidi. PM<sub>1</sub>: Hiukkaset, joiden halkaisija on alle 1 µm. PM<sub>2.5</sub>: Hiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 µm.

### 3.3 Ei-työperäinen altistuminen

Pienhiukkasten (PM<sub>2.5</sub>) pitoisuuden vuosikeskiarvo on pääkaupunkiseudulla liikenneympäristöissä noin 10–12 µg/m<sup>3</sup>, muualla kaupunkialueella noin 8–10 µg/m<sup>3</sup> ja kaupunkialueen ulkopuolella noin 7–8 µg/m<sup>3</sup> (YTV 2008a). EU:n tavoite- ja raja-arvo pienhiukkaspitoisuuden vuosikeskiarvolle on 25 µg/m<sup>3</sup> ja WHO:n ohjearvo 10 µg/m<sup>3</sup>. Korkeimmat mitatut pienhiukkasten vuorokausipitoisuudet vuonna 2007 olivat kaupunkialueella 34 µg/m<sup>3</sup> ja kaupunkialueen ulkopuolella 29 µg/m<sup>3</sup> (YTV 2008b). Noin puolet hiukkasmassasta aiheutuu kaukokulkeumasta ja puolet paikallisista päästöistä (YTV 2008a). Autoliikenteen osuus paikallisista päästöistä on noin kolmannes, josta valtaosa dieselmoottorien hiukkaspäästöjä. Alkuainehiilen osuus hiukkasmassasta on noin 8 %.



Typpidioksidin (NO<sub>2</sub>) vuosikeskiarvo pääkaupunkiseudulla vuonna 2007 oli liikenneympäristöissä 0,02 ppm, muualla kaupunkialueella 0,01 ppm ja kaupunkialueen ulkopuolella 0,003 ppm (YTV 2008b). Typpidioksidin vuosiraja-arvo on 0,02 ppm. Korkein mitattu tuntipitoisuus oli 0,13 ppm. Typpimonoksidin (NO) vuosikeskiarvo oli liikenneympäristöissä 0,02–0,03 ppm, muualla kaupunkialueella 0,005–0,02 ppm ja kaupunkialueen ulkopuolella 0,001 ppm.

Hiilimonoksidin (CO) vuosikeskiarvo kaupunkialueella on noin 0,25 ppm. Suurin mitattu kahdeksan tunnin keskiarvopitoisuus liikenneympäristössä vuonna 2007 oli 2 ppm (YTV 2008b). PAH-yhdisteiden indikaattoriyhdisteenä mitatun bentso(a)pyreenin vuosikeskiarvo kaupunkialueella oli noin 0,3 ng/m<sup>3</sup> (kuukausikeskiarvo 0,1–0,9 ng/m<sup>3</sup>).

### 3.4 Yhteenveto altistumistiedoista

Työterveyslaitoksen vuosina 2008–2015 toteuttamissa mittauksissa dieselnoen (alkuainehiili, alveolijae) keskiarvo- ja mediaanipitoisuus maanalaisissa kaivoksissa ja tunnelityömailla oli 105 ja 58 µg EC/m<sup>3</sup>. Varastoissa, tuotantohalleissa ja vastaavissa tiloissa keskiarvo- ja mediaanipitoisuudet olivat selvästi alhaisempia, 40 ja 10 µg EC/m<sup>3</sup>. Typpidioksidin pitoisuus varastoissa, terminaaleissa ja vastaavissa kohteissa tehdyissä mittauksissa on ollut <0,1–0,9 ppm NO<sub>2</sub>. Typpidioksidipitoisuus on ollut matala (≤0,5 ppm NO<sub>2</sub>) myös maanalaisissa kaivoksissa tehdyissä mittauksissa.

Ulkomaisissa tutkimuksissa korkeampia dieselnokipitoisuuksia on mitattu maanalaisissa kaivoksissa (keskipitoisuudet uusimmissa tutkimuksissa 30–488 µg EC/m<sup>3</sup>) ja tunnelityömailla (56–314 µg EC/m<sup>3</sup>). Keskimääräiset altistumistasot varastoissa ja terminaaleissa ovat olleet luokkaa 2–122 µg EC/m<sup>3</sup>, autokorjaamoissa noin 4–39 µg EC/m<sup>3</sup> ja maanpäällisissä kaivoksissa ja rakennustyömailla noin 1–39 µg EC/m<sup>3</sup>. Ammattiautoilijoiden keskimääräinen altistumistaso on uudemmissa tutkimuksissa ollut noin 1–7 µg EC/m<sup>3</sup>.

Typpidioksidin keskipitoisuudet ovat ulkomaisissa tutkimuksissa olleet maanalaisissa kaivoksissa ja tunnelityömailla 0,1–0,9 ppm NO<sub>2</sub>, varastoissa, terminaaleissa ja autokorjaamoissa 0,05–0,2 ppm NO<sub>2</sub>, maanpäällisissä kaivoksissa ja rakennustyömailla 0,01–0,3 ppm NO<sub>2</sub> ja bussien, rekkojen ja taksien hyteissä 0,02–0,04 ppm NO<sub>2</sub>.

Ulkoilman typpidioksidin vuosikeskiarvo pääkaupunkiseudulla vuonna 2007 oli liikenneympäristöissä 0,02 ppm, muualla kaupunkialueella 0,01 ppm ja kaupunkialueen ulkopuolella 0,003 ppm. Dieselnoen (alkuainehiili) pitoisuus kaupunki-ilmassa on noin 1 µg EC/m<sup>3</sup>.

## 4 Altistumisen hallintakeinot

Dieselmootoreiden päästönormeja on tiukennettu EU:ssa merkittävästi viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana. Esimerkiksi uusien raskaan liikenteen dieselmootoreiden suurin sallittu päästötaso on laskenut tasolta 0,36 g/kWh tasolle 0,01 g/kWh (1992–2013), ja uusien työkonemootoreiden tasolta 0,54–0,85 g/kWh tasolle 0,025 g/kWh (1999–2014) (Ecopoint 2013). Päästönormien tiukentuminen EU:ssa ja muualla maailmassa on johtanut dieselmootoreiden ja pakokaasujen jälkikasittelytekniikan kehittymisen. Dieselmootoreiden uusimisella tai hiukkassuodattimien jälkiasennuksella vanhempiin laitteisiin voidaan merkittävästi vähentää

altistumista erityisesti dieselpakokaasuhiukkasille. Myös orgaanisten yhdisteiden päästöt ovat alhaisempia uusilla moottoreilla.

Jälkiasennettujen hiukkassuodattimien on tutkimuksissa todettu vähentävän työntekijöiden altistumista dieselpakokaasuhiukkasille dieseltrukkityössä (lastauslaituri) 92 % (Cantrell ja Watts 1997) ja kaivoksissa 95 % (Haney ym. 1997). Hollannissa tehdyssä tutkimuksessa todettiin dieselkäyttöisten jäteautojen vaihtamisen maakaasukäyttöisiin ja hiukkassuodattimen asentamisen dieselkäyttöisiin autoihin vähentävän jätteenkeräilijöiden altistumista, mutta vaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevä, sillä muun liikenteen vaikutus altistumistasoihin oli huomattava (Kromhout ym. 2009).

Taulukossa 4 on esitetty keinoja dieselpakokaasualtistumisen hallintaan erityyppisissä töissä.

Taulukko 4. Suositeltavia ratkaisuja dieselpakokaasualtistumisen hallintaan.

| Altistava työ   | Altistumisen vähentämiskeinot   |
|---|---|
| Kaivokset ja maanalaiset rakennustyömaat (esim. tunnelityö)             | Dieselpakokaasujen jälkikäsittely (erit. hiukkassuodattimet)<br>Ilmanvaihdon tehostaminen<br>Tehokkaat suodattimet ja ilmapuotojen estäminen työkoneiden ja ajoneuvojen hytteihin<br>Dieselkoneiden säännöllinen huolto |
| Tuotantohallit ja varastot  | Sähkö/kaasukäyttöiset trukit<br>Dieselpakokaasujen jälkikäsittely (erit. hiukkassuodattimet)<br>Tyhjäkäynnin välttäminen<br>Ilmanvaihdon tehostaminen<br>Dieselkoneiden säännöllinen huolto                             |
| Bussi- ja rekkahallit   | Dieselpakokaasujen jälkikäsittely (erit. hiukkassuodattimet)<br>Tyhjäkäynnin välttäminen<br>Ilmanvaihdon tehostaminen   |
| Autokorjaamot ja katsastusasemat  | Dieselpakokaasujen johtaminen letkua myöten ulos tai siirrettävä hiukkassuodatin pakoputken päähän<br>Tyhjäkäynnin välttäminen<br>Ilmanvaihdon tehostaminen   |
| Pilaantuneiden maa-alueiden kunnostus (telttakaivu ja hallivarastointi) | Teltassa työkoneen pakokaasujen johtaminen letkua myöten ulos<br>Halleissa ilmanvaihdon tehostaminen, lyhempi käyntiaika ja/tai dieselpakokaasujen jälkikäsittely (erit. hiukkassuodattimet)                            |
| Jätteenkeräily  | Kaasukäyttöiset ajoneuvot<br>Dieselpakokaasujen jälkikäsittely (erit. hiukkassuodattimet)   |
| Rakennustyömaat ja maansiirtotyöt                                       | Dieselpakokaasujen jälkikäsittely (erit. hiukkassuodattimet)  |

## 5 Terveysvaikutukset

### 5.1 Kulkeutuminen elimistöön, aineenvaihdunta ja poistuminen elimistöstä

Pienen kokonsa vuoksi valtaosa keuhkoihin pidäytyvistä dieselpakokaasuhiukkasista päätyy keuhkojen alveolialueelle (US EPA 2002). Pakokaasuhiukkaset ovat niukkaliukoisia, joten ne poistuvat alveoleista pääasiassa syöjäsolujen kuljettamina keuhkojen ylempiin osiin ja edelleen ruuansulatuskanavaan. Hiukkaset voivat myös kulkeutua alveolien ohuen epiteelin läpi ja päätyä imusuonistoon ja verenkiertoon. Keuhkoputkiin pidäytyneet hiukkaset kulkeutuvat keuhkojen puhdistusmekanismin vaikutuksesta ruuansulatuskanavaan. Puoliintumisajan hiukkasten eliminaatiolle alveolialueelta on eläinkokeissa raportoitu olevan noin 60–100 vrk (US EPA 2002). Puoliintumisaika keuhkoputkissa on noin 1 vrk.

Dieselpakokaasun kaasufaasin yhdisteistä typpidioksidi pääsee helposti alahengitysteihin (DECOS 2004). Kaasu voi liueta keuhkoepiteelin pinnalla olevaan nestekalvoon muodostaen typpihapoketta, typpihappoa ja näiden suoloja. Typpidioksidi ja/tai sen muodostamat yhdisteet imeytyvät helposti keuhkoista verenkiertoon. Typpidioksidi poistuu elimistöstä nitraattina virtsassa.

### 5.2 Lyhytaikaisen altistumisen vaikutukset

Dieselpakokaasu voi ärsyttää silmiä ja hengitysteitä. Vapaaehtoisilla tehdyissä kokeissa kahden tunnin altistuminen dieselpakokaasuille pitoisuudessa 100 µg/m<sup>3</sup> (hiukkaset) ja 0,2 ppm NO<sub>2</sub> aiheutti lievää nenän, kurkun ja silmien ärsytystä osalla altistuneista (Mudway ym. 2004). Selviä ärsytysvaikutuksia havaittiin pitoisuudessa 300 µg/m<sup>3</sup> (hiukkaset) ja 1,3 ppm NO<sub>2</sub> (Wierzbicka ym. 2014).

Dieselpakokaasu-altistumisen välittömiä vaikutuksia hengitysteihin ja verenkiertoelimistöön on selvitetty useissa vapaaehtoisilla tehdyissä tutkimuksissa. Terveillä koehenkilöillä, joita altistettiin kahden tunnin ajan laimennetulle jälkikäsittelemättömälle dieselpakokaasulle pitoisuudessa 100 µg/m<sup>3</sup> (hiukkaset) ja 0,2–0,4 ppm NO<sub>2</sub>, havaittiin lievä nousu neutrofiilien määrässä yläkeuhkoputkien alueen keuhkohuuhteessa sekä kohonnut hengitystieresistanssi (Stenfors ym. 2004; Mudway ym. 2004; Behndig ym. 2006; 2011). Muutoksia verisuonten toiminnassa on raportoitu terveillä koehenkilöillä 1–2 tunnin altistumisessa pitoisuudessa 250–350 µg/m<sup>3</sup> (hiukkaset) (Barath ym. 2010; Lucking ym. 2011; Mills ym. 2005; 2011; Tornqvist ym. 2007). Muutoksia verisuonten toiminnassa ei ole havaittu pakokaasulla, josta hiukkaset on poistettu hiukkassuodattimella (Lucking ym. 2011; Mills ym. 2011).

Myös lyhytaikaisen typpidioksidialtistumisen vaikutuksia hengitysteihin on tutkittu lukuisissa vapaaehtoisilla tehdyissä kokeissa. Kokeessa, jossa terveitä koehenkilöitä altistettiin kolmen tunnin ajan typpidioksidille pitoisuudessa 0,6 ja 1,5 ppm NO<sub>2</sub>, havaittiin hyvin lievä, annoksesta riippuva nousu neutrofiilien määrässä yläkeuhkoputkien alueen keuhkohuuhteessa (Frampton ym. 2002). Altistumistasolla 1,5 ppm neutrofiilien määrä keuhkohuuhteessa korreloi koettujen lievien hengitystieoireiden kanssa.

Muutamissa vapaaehtoisilla tehdyissä kokeissa dieselpakokaasuhiukkasten (300 µg) annostelu koehenkilöiden sieraimiin samanaikaisesti allergeenien kanssa lisäsi allergisen reaktion voimakkuutta (Diaz-Sanchez ym. 1997; 1999). Dieselpakokaasun hengittäminen kahden tunnin ajan pitoisuudessa 100 µg/m<sup>3</sup> (hiukkaset) ja 0,4 ppm NO<sub>2</sub> ei kuitenkaan muuttanut lievästi

astmaattisten koehenkilöiden allergista rektiota samanaikaisesti annostellulle allergeenille (Riedl ym. 2012).

### 5.3 Pitkäaikaisen altistumisen vaikutukset

#### 5.3.1 Epidemiologiset tutkimukset

Työperäinen altistuminen dieselpakokaasuille on liitetty kohonneeseen keuhkosityöpärisäkin useissa epidemiologisissa tutkimuksissa ja meta-analyyseyssä (Attfield ym. 2012; Silverman ym. 2012; 2014; Garshick ym. 2008; 2012; Laden ym. 2006; Pintos ym. 2012; Villeneuve ym. 2011; Gustavsson ym. 2000; Olsson ym. 2011; Lipsett ja Campleman 1999; Bhatia ym. 1998). Esimerkiksi Yhdysvalloissa toteutetussa laajassa kaivostyöntekijöitä koskeneessa tutkimuksessa keuhkosityöpäkuolleisuus korreloi kumulatiiviseen dieselpakokaasualtistumisen (alveolijakeen alkuainehiili) kanssa (Attfield ym. 2012; Silverman ym. 2012; 2014). Keuhkosityöpäkuolleisuuden riskisuhde eniten altistuneessa ryhmässä ( $\geq 536 \mu\text{g EC}/\text{m}^3\text{-vuotta}$ ) oli 2,8 (95 % luottamusväli 1,3–6,3) verrattuna vähiten altistuneeseen ryhmään ( $< 3 \mu\text{g EC}/\text{m}^3\text{-vuotta}$ ).

Vermeulen ym. (2014) laski dieselpakokaasualtistumiseen liittyvän keuhkosityöpärisäkin kolmen kvantitatiivista annos-vastetietoa tuottaneen epidemiologisen tutkimuksen pohjalta (Garshick ym. 2002; Silverman ym. 2012; Steenland ym. 1998). Näiden tutkimusten perusteella mallinnettu kumulatiivisen dieselpakokaasualtistumisen ja keuhkosityöpärisäkin (RR) suhdetta kuvaava yhtälö oli  $\ln\text{RR} = 0,00098 * \mu\text{g EC}/\text{m}^3\text{-vuotta}$  (95 % luottamusväli  $0,00055\text{--}0,0014 * \mu\text{g EC}/\text{m}^3\text{-vuotta}$ ). Tällä yhtälöllä laskettuna työperäinen altistuminen 45 vuoden ajan dieselpakokaasuille altistumistasoilla 1, 10 ja  $25 \mu\text{g EC}/\text{m}^3$  aiheuttaisi yhteensä 17, 200 ja 689 ylimääräistä syöpäkuolemaa 10 000 työntekijää kohti 80 ikävuoteen mennessä (Vermeulen ym. 2014). Keuhkosityöpärisäkin arviointiin erityisesti alhaisemmilla altistumistasoilla liittyy kuitenkin huomattavia epävarmuuksia.

Dieselpakokaasualtistuminen on joissakin tutkimuksissa liitetty myös kohonneeseen riskiin sairastua virtsarakon syöpiin (IARC 2013).

#### 5.3.2 Tiedot eläinkokeista

Kahden vuoden toistuva altistuminen dieselpakokaasuille on aiheuttanut rotissa altistumistasosta riippuvia tulehduksellisia muutoksia keuhkoissa altistumistasoilla  $\geq 210 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (hiukkaset) ja hyvin voimakkaassa altistumisessa ( $\geq 2200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) myös keuhkosityöpiä (Kato ym. 2000; Ishihara ja Kagawa 2003; Brightwell ym. 1986; Stinn ym. 2005; Ishinishi ym. 1988; Mauderly ym. 1987; Nikula ym. 1995). Kokeessa, jossa rottia altistettiin kahden vuoden ajan modernin dieselmoottorin jälkikäsitellyille pakokaasuille, havaittiin lieviä fibroottisia muutoksia keuhkorakkulatiehyeissä altistumistasolla  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (hiukkaset;  $4,2 \text{ ppm NO}_2$ ) (McDonald ym. 2012; 2015). Vaikutusten arvioitiin johtuvan pääasiassa pakokaasun sisältämästä typpidioksidista. Keuhkosityöpiin viittavia muutoksia ei havaittu. Altistumistasoilla  $\leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (hiukkaset;  $\leq 0,9 \text{ ppm NO}_2$ ) ei havaittu vaikutuksia.

Dieselpakokaasut ja pakokaasuhiukkaset ovat useissa tutkimuksissa aiheuttaneet genotoksisia vaikutuksia bakteeri- ja soluviljelmissä sekä koe-eläimissä (IARC 2013). Kokeessa, jossa hiiriä ja rottia altistettiin yhden, kolmen ja 24 kuukauden (rotat) ajan modernin dieselmoottorin jälkikäsitellyille pakokaasuille altistumistasoilla  $\leq 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (hiukkaset;  $\leq 4,2 \text{ ppm NO}_2$ ), ei havaittu

genotoksisia muutoksia koe-eläinten keuhkoissa tai veressä (Hallberg ym. 2012; 2015; Bemis ym. 2012; 2015).

Joissakin eläinkokeissa altistuminen vanhempien moottoreiden jälkikäsittelemättömille dieselpakokaasuille on liitetty sydän- ja verisuonivaikutuksiin, hengitystieallergeenien vaikutuksia voimistaviin vaikutuksiin, neuroinflammatorisiin vaikutuksiin sekä lisääntymiselle haitallisiin vaikutuksiin (Taxell ja Santonen 2015).

## 6 Ehdotus dieselpakokaasujen tavoitetasoksi

### Lakisääteinen taso

Dieselpakokaasuille ei ole asetettu HTP-arvoa (STM 2014). Vertailupitoisuutena Suomessa on käytetty mm. Sveitsin ohjeraja-arvoa 100 µg EC/m<sup>3</sup> (8h) (alkuainehiilen alveolijae) sekä typpidioksidin HTP-arvoja 3 ppm (8 h) ja 6 ppm (15 min).

### Tavoitetaso

Työperäinen altistuminen dieselpakokaasuille on epidemiologisissa tutkimuksissa liitetty kohonneeseen keuhkosityöpärisiin. Kolmen epidemiologisen tutkimuksen perusteella mallinnettu kumulatiivisen dieselpakokaasualtistumisen ja keuhkosityöpärisin (RR) suhdetta kuvaava yhtälö on  $\ln RR = 0,00098 * \mu\text{g EC/m}^3\text{-vuotta}$  (95 % luottamusväli 0,00055–0,0014 \* µg EC/m<sup>3</sup>-vuotta) (Vermeulen ym. 2014). Tällä yhtälöllä laskettuna, huomioiden keuhkosityövän taustaesiintyvyys suomalaisessa väestössä vuonna 2013, 40 vuoden työperäinen altistuminen dieselpakokaasuille keskimääräisellä altistumistasoilla 20 µg EC/m<sup>3</sup> johtaisi 8,7 ylimääräiseen keuhkosityöpään 10 000 altistunutta työntekijää kohti vuodessa (riski 8,7\*10<sup>-4</sup>; 95 % luottamusväli 4,0–15\*10<sup>-4</sup>). Vastaavasti 40 vuoden työperäinen altistuminen keskimääräisellä altistumistasolla 5 µg EC/m<sup>3</sup> johtaisi 1,6 ylimääräiseen keuhkosityöpään 10 000 altistunutta työntekijää kohti vuodessa (riski 1,6\*10<sup>-4</sup>; 95 % luottamusväli 0,88–2,4\*10<sup>-4</sup>). Näitä riskisuhteita tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava epävarmuudet, jotka liittyvät esimerkiksi altistumisen arviointiin taustalla olevissa epidemiologisissa tutkimuksissa sekä annos-vastekuvaajan muotoon. Lisäksi altistuminen tutkimuksissa on tapahtunut useiden vuosikymmenten aikana eikä riskisuhteeksi suoraan kuvaa modernien dieselmoottorien jälkikäsiteltyihin pakokaasuihin mahdollisesti liittyvää syöpärisiä.

Huomioiden Suomessa (sekä muualla Euroopassa ja Yhdysvalloissa) tehtyjen altistumismittausten tulokset ja luvussa 4 esitetyt mahdollisuudet altistumisen hallintaan, dieselpakokaasualtistumiseen liittyvän keuhkosityöpärisin pienentämiseksi ehdotettu tavoitetaso (8 h) maanalaisille kaivoksille ja maanalaisille rakennustyömaille on 20 µg EC/m<sup>3</sup> (alveolijae) ja muille työympäristöille 5 µg EC/m<sup>3</sup> (alveolijae). Ehdotettuihin tavoitetasoihin pyrkimällä voidaan pienentää työperäiseen dieselpakokaasualtistumiseen liittyvää keuhkosityöpärisiä. Koska syöpärisiä ei kuitenkaan pystytä ehdotetuilla tasoilla täysin poissulkemaan, tullaan tavoitetasoja tarkastelemaan uudelleen dieselmoottoritekniikan kehittyessä ja moottorikannan uusiutuessa.

Dieselpakokaasu voi vaikuttaa hengitysteihin myös lyhytaikaisessa altistumisessa. Vapaaehtoisilla tehdyissä kokeissa dieselpakokaasut ovat aiheuttaneet lieviä tulehduksellisia muutoksia keuhkoissa sekä keuhkojen virtausvastuksen nousua kahden tunnin altistumisessa tasolla 100 µg/m<sup>3</sup> (hiukkaset) ja 0,2–0,4 ppm NO<sub>2</sub>. Kolmen tunnin altistuminen typpidioksidille tasolla 0,6 ppm ja 1,5 ppm on aiheutunut lieviä tulehduksellisia vaikutuksia keuhkoissa, tasolla 1,5 ppm myös lieviä

koettuja hengitystieoireita. Lyhytaikaisen pakonkaasualtistumisen aiheuttamien hengitystievaikutusten minimoimiseksi ehdotettu tavoitetaso (15 min) maanalaisille kaivoksille ja maanalaisille rakennustyömaille on 0,5 ppm NO<sub>2</sub> (1,0 mg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>) ja muille työympäristöille 0,2 ppm NO<sub>2</sub> (0,4 mg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>).

Ehdotetuilla tavoitetasoilla riski pakokaasujen muihin terveysvaikutuksiin on pieni.

## 7 Kirjallisuus

- Attfield MD, Schleiff PL, Lubin JH, Blair A, Stewart PA, Vermeulen R, Coble JB, Silverman DT. (2012) The Diesel Exhaust in Miners study: a cohort mortality study with emphasis on lung cancer. *J Natl Cancer Inst*; 104 869-83.
- Arbetsmiljöverket. (2011). Hygieniska gränsvärden och åtgärder mot luftföroreningar. Arbetsmiljöverkets författningssamling, AFS 2011:18. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- Bakke B, Stewart P, Ulvestad B, Eduard W. (2001) Dust and gas exposure in tunnel construction work. *AIHAJ*; 62 457-65.
- Bakke B, Ulvestad B, Thomassen Y, Woldbaek T, Ellingsen DG. (2014) Characterization of Occupational Exposure to Air Contaminants in Modern Tunnelling Operations. *Annals of Occupational Hygiene*; 58 818-29.
- Barath S, Mills NL, Lundback M, Tornqvist H, Lucking AJ, Langrish JP, Soderberg S, Boman C, Westerholm R, Londahl J, *et al.* (2010) Impaired vascular function after exposure to diesel exhaust generated at urban transient running conditions. *Part Fibre Toxicol*; 7 19.
- BASK. (2001) Grenzwerteverordnung 2011. Wien: Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz.
- Behndig AF, Larsson N, Brown JL, Stenfors N, Helleday R, Duggan ST, Dove RE, Wilson SJ, Sandstrom T, Kelly FJ, *et al.* (2011) Proinflammatory doses of diesel exhaust in healthy subjects fail to elicit equivalent or augmented airway inflammation in subjects with asthma. *Thorax*; 66 12-9.
- Behndig AF, Mudway IS, Brown JL, Stenfors N, Helleday R, Duggan ST, Wilson SJ, Boman C, Cassee FR, Frew AJ, *et al.* (2006) Airway antioxidant and inflammatory responses to diesel exhaust exposure in healthy humans. *Eur Respir J*; 27 359-65.
- Bemis JC, Torous DK, Dertinger SD, Committee HEIHR. (2015) Part 2. Assessment of micronucleus formation in rats after chronic exposure to new-technology diesel exhaust in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst*; 69-82; discussion 141-71.
- Bemis JC, Torous DK, Dertinger SD, Hei HRC. (2012) Part 2. Assessment of genotoxicity after exposure to diesel exhaust from U.S. 2007-compliant diesel engines: report on 1- and 3-month exposures in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst*; 166 125-57.
- Bhatia R, Lopipero P, Smith AH. (1998) Diesel exhaust exposure and lung cancer. *Epidemiology*; 9 84-91.
- Brightwell J, Fouillet X, Cassano-Zoppi AL. (1986) Neoplastic and functional changes in rodents after chronic inhalation of engine exhaust emissions. Teoksessa: Ishinishi, N, Koizumi, A, McClellan, RO. (toim.). Carcinogenic and mutagenic effects of diesel engine exhaust: proceedings of the international satellite symposium on toxicological effects of emissions from diesel engines. Tsukuba Science City: Elsevier Science Publishers B. V.
- Cantrell BK, Watts WF Jr (1997). Diesel exhaust aerosol: Review of occupational exposure. *Appl Occup Environ Hyg*; 12 1019-1027.
- Coble JB, Stewart PA, Vermeulen R, Yereb D, Stanevich R, Blair A, Silverman DT, Attfield M. (2010) The Diesel Exhaust in Miners Study: II. Exposure Monitoring Surveys and Development of Exposure Groups. *Annals of Occupational Hygiene*; 54 747-61.
- Cohen HJ, Borak J, Hall T, Sirianni G, Chemerynski S. (2002) Exposure of miners to diesel exhaust particulates in underground nonmetal mines. *Aiha Journal*; 63 651-58.

- Davis ME, Smith TJ, Laden F, Hart JE, Blicharz AP, Reaser P, Garshick E. (2007) Driver exposure to combustion particles in the U.S. Trucking industry. *J Occup Environ Hyg*; 4 848-54.
- DECOS. (2004) Nitrogen dioxide: Health-based recommended occupational exposure limit. The Hague: Health Council of the Netherlands/Dutch Expert Committee on Occupational Standards.
- Diaz-Sanchez D. et al. (1997) Combined diesel exhaust particulate and ragweed allergen challenge markedly enhances human in vivo nasal ragweed-specific IgE and skews cytokine production to a T helper cell 2-type pattern. *J Immunol*; 158 2406-13.
- Diaz-Sanchez D. et al. (1999) Nasal challenge with diesel exhaust particles can induce sensitization to a neoallergen in the human mucosa. *J Allergy Clin Immunol*; 104 1183-8.
- Ecopoint. (2015) DieselNET. Saatavissa: <https://www.dieselnet.com/> (viitattu 1.6.2015)
- Frampton MW, Boscia J, Roberts NJ, Jr., Azadniv M, Torres A, Cox C, Morrow PE, Nichols J, Chalupa D, Frasier LM, et al. (2002) Nitrogen dioxide exposure: effects on airway and blood cells. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*; 282 L155-65.
- Garshick E, Laden F, Hart JE, Davis ME, Eisen EA, Smith TJ. (2012) Lung cancer and elemental carbon exposure in trucking industry workers. *Environ Health Perspect*; 120 1301-6.
- Garshick E, Laden F, Hart JE, Rosner B, Davis ME, Eisen EA, Smith TJ. (2008) Lung cancer and vehicle exhaust in trucking industry workers. *Environ Health Perspect*; 116 1327-32.
- Garshick E, Smith TJ, Laden F. (2002) Quantitative assessment of lung cancer risk from diesel exhaust exposure in the US trucking industry: a feasibility study. Teoksessa: McLellan, G. (toim). HEI special report. Research directions to improve estimates of human exposure and risk from diesel exhaust. A special report of the Institute's diesel epidemiology working group. Boston, MA: Health Effects Institute.
- Gustavsson P, Jakobsson R, Nyberg F, Pershagen G, Jarup L, Scheele P. (2000) Occupational exposure and lung cancer risk: a population-based case-referent study in Sweden. *Am J Epidemiol*; 152 32-40.
- Hallberg LM, Ward JB, Hernandez C, Ameredes BT, Wickliffe JK, Committee HEIHR. (2015) Part 3. Assessment of genotoxicity and oxidative damage in rats after chronic exposure to new-technology diesel exhaust in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst*; 87-105; discussion 41-71.
- Hallberg LM, Ward JB, Hernandez C, Ameredes BT, Wickliffe JK, Hei HRC. (2012) Part 3. Assessment of genotoxicity and oxidative stress after exposure to diesel exhaust from U.S. 2007-compliant diesel engines: report on 1- and 3-month exposures in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst*; 166 163-84.
- Haney RA, Saseen GP, Waytulonis RW (1997). An overview of diesel particulate exposures and control technology in the U.S. mining industry. *Appl Occup Environ Hyg* 12: 1013-1018.
- Hesterberg TW, Long CM, Bunn WB, Lapin CA, McClellan RO, Valberg PA. (2012) Health effects research and regulation of diesel exhaust: an historical overview focused on lung cancer risk. *Inhalation Toxicology*; 24 1-45.
- HSE. (1999) Control of diesel engine exhaust emissions in the workplace. London: Health and Safety Executive.
- IARC. (2013) Diesel and gasoline engine exhaust and some nitroarenes. Lyon: International Agency for Research on Cancer.
- Ishihara Y, Kagawa J. (2003) Chronic diesel exhaust exposures of rats demonstrate concentration and time-dependent effects on pulmonary inflammation. *Inhalation Toxicology*; 15 473-92.
- Ishinishi N, Kuwabara N, Takaki Y. (1988) Long-term inhalation experiments on DE. Tsukuba, Ibaraki: Japan Automobile Research Institute Inc., Research Committee for HERP Studies.
- Kato A, Nagai A, Kagawa J. (2000) Morphological changes in rat lung after long-term exposure to diesel emissions. *Inhalation Toxicology*; 12 469-90.
- Khalek IA, Bougher TL, Merritt PM, Zielinska B. (2011) Regulated and Unregulated Emissions from Highway Heavy-Duty Diesel Engines Complying with US Environmental Protection Agency 2007 Emissions Standards. *Journal of the Air & Waste Management Association*; 61 427-42.
- Kromhout H, Peters S, Vlaanderen J, Veldhof R (2009). Effectiveness of control measures of exposure to diesel engine exhaust emissions in the workplace. *Proceedings of the 29th*

- ICOH, International Congress on Occupational Health. Cape Town, South Africa, 22 - 27 March 2009. pp. 245.
- Laden F, Hart JE, Eschenroeder A, Smith TJ, Garshick E. (2006) Historical estimation of diesel exhaust exposure in a cohort study of U.S. railroad workers and lung cancer. *Cancer Causes Control*; 17 911-9.
- Lewne M, Plato N, Gustavsson P. (2007) Exposure to particles, elemental carbon and nitrogen dioxide in workers exposed to motor exhaust. *Annals of Occupational Hygiene*; 51 693-701.
- Lipsett M, Campleman S. (1999) Occupational exposure to diesel exhaust and lung cancer: a meta-analysis. *Am J Public Health*; 89 1009-17.
- Liu ZG, Berg DR, Vasys VN, Dettmann ME, Zielinska B, Schauer JJ. (2010) Analysis of C-1, C-2, and C-10 through C-33 particle-phase and semi-volatile organic compound emissions from heavy-duty diesel engines. *Atmospheric Environment*; 44 1108-15.
- Lucking AJ, Lundback M, Barath SL, Mills NL, Sidhu MK, Langrish JP, Boon NA, Pourazar J, Badimon JJ, Gerlofs-Nijland ME, *et al.* (2011) Particle traps prevent adverse vascular and prothrombotic effects of diesel engine exhaust inhalation in men. *Circulation*; 123 1721-8.
- Mauderly JL, Jones RK, Griffith WC, Henderson RF, McClellan RO. (1987) Diesel exhaust is a pulmonary carcinogen in rats exposed chronically by inhalation. *Fundam Appl Toxicol*; 9 208-21.
- McClellan RO, Hesterberg TW, Wall JC. (2012) Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*; 63 225-58.
- McDonald JD, Barr EB, White RK, Chow JC, Schauer JJ, Zielinska B, Grosjean E. (2004) Generation and characterization of four dilutions of diesel engine exhaust for a subchronic inhalation study. *Environmental Science & Technology*; 38 2513-22.
- McDonald JD, Doyle-Eisele M, Gigliotti A, Miller RA, Seilkop S, Mauderly JL, Seagrave J, Chow J, Zielinska B, Hei HRC. (2012) Part 1. Biologic responses in rats and mice to subchronic inhalation of diesel exhaust from U.S. 2007-compliant engines: report on 1-, 3-, and 12-month exposures in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst*; 166 9-120.
- McDonald JD, Doyle-Eisele M, Seagrave J, Gigliotti AP, Chow J, Zielinska B, Mauderly JL, Seilkop SK, Miller RA, Committee HEIHR. (2015) Part 1. Assessment of carcinogenicity and biologic responses in rats after lifetime inhalation of new-technology diesel exhaust in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst*; 9-44; discussion 141-71.
- Mills NL, Miller MR, Lucking AJ, Beveridge J, Flint L, Boere AJ, Fokkens PH, Boon NA, Sandstrom T, Blomberg A, *et al.* (2011) Combustion-derived nanoparticulate induces the adverse vascular effects of diesel exhaust inhalation. *Eur Heart J*; 32 2660-71.
- Mills NL, Tornqvist H, Robinson SD, Gonzalez M, Darnley K, MacNee W, Boon NA, Donaldson K, Blomberg A, Sandstrom T, *et al.* (2005) Diesel exhaust inhalation causes vascular dysfunction and impaired endogenous fibrinolysis. *Circulation*; 112 3930-6.
- Montelius J. (2003) Consensus report for diesel exhaust. Scientific basis for Swedish occupational standards XXIV. *Arbete och hälsa*; 16 13-30.
- MSHA. (2013) Title 30 CFR. Mineral Resources. Code of federal regulation, CFR 30 (part 57.5060: Limit on exposure to diesel particulate matter). Arlington: Mine Safety and Health Administration.
- Mudway IS, Stenfors N, Duggan ST, Roxborough H, Zielinski H, Marklund SL, Blomberg A, Frew AJ, Sandstrom T, Kelly FJ. (2004) An in vitro and in vivo investigation of the effects of diesel exhaust on human airway lining fluid antioxidants. *Arch Biochem Biophys*; 423 200-12.
- Nikula KJ, Snipes MB, Barr EB, Griffith WC, Henderson RF, Mauderly JL. (1995) Comparative pulmonary toxicities and carcinogenicities of chronically inhaled diesel exhaust and carbon black in F344 rats. *Fundam Appl Toxicol*; 25 80-94.
- Olsson AC, Gustavsson P, Kromhout H, Peters S, Vermeulen R, Bruske I, Pesch B, Siemiatycki J, Pintos J, Bruning T, *et al.* (2011) Exposure to diesel motor exhaust and lung cancer risk in a pooled analysis from case-control studies in Europe and Canada. *Am J Respir Crit Care Med*; 183 941-8.



- Pintos J, Parent ME, Richardson L, Siemiatycki J. (2012) Occupational exposure to diesel engine emissions and risk of lung cancer: evidence from two case-control studies in Montreal, Canada. *Occupational and Environmental Medicine*; 69 787-92.
- Pronk A, Coble J, Stewart PA. (2009) Occupational exposure to diesel engine exhaust: A literature review. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*; 19 443-57.
- Riedl MA et al. (2012) Allergic inflammation in the human lower respiratory tract affected by exposure to diesel exhaust. *Res Rep Health Eff Inst*; 165 5-43; discussion 45-64.
- Seshagiri B. (2003) Exposure to diesel exhaust emissions on board locomotives. *AIHA J (Fairfax, Va)*; 64 678-83.
- Silverman DT, Lubin JH, Blair AE, Vermeulen R, Stewart PA, Schleiff PL, Attfield MD. (2014) RE: The Diesel Exhaust in Miners Study (DEMS): a nested case-control study of lung cancer and diesel exhaust. *J Natl Cancer Inst*; 106.
- Silverman DT, Samanic CM, Lubin JH, Blair AE, Stewart PA, Vermeulen R, Coble JB, Rothman N, Schleiff PL, Travis WD, et al. (2012) The Diesel Exhaust in Miners study: a nested case-control study of lung cancer and diesel exhaust. *J Natl Cancer Inst*; 104 855-68.
- Steenland K, Deddens J, Stayner L. (1998) Diesel exhaust and lung cancer in the trucking industry: exposure-response analyses and risk assessment. *Am J Ind Med*; 34 220-8.
- Stenfors N, Nordenhall C, Salvi SS, Mudway I, Soderberg M, Blomberg A, Helleday R, Levin JO, Holgate ST, Kelly FJ, et al. (2004) Different airway inflammatory responses in asthmatic and healthy humans exposed to diesel. *Eur Respir J*; 23 82-6.
- Stinn W, Teredesai A, Anskeit E, Rustemeier K, Schepers G, Schnell P, Haussmann HJ, Carchman RA, Coggins CR, Reininghaus W. (2005) Chronic nose-only inhalation study in rats, comparing room-aged sidestream cigarette smoke and diesel engine exhaust. *Inhalation Toxicology*; 17 549-76.
- STM. (2014) HTP-arvot 2014. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö.
- Suva (2014). Grenzwerte am Arbeitsplatz 2014. Luzern: Schweizerische Unfallversicherungsanstalt.
- Taxell P, Santonen T. (2015). The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals and the Dutch Expert Committee on Occupational Safety. 149. Diesel engine exhaust. *Arbete och Hälsa (in press)*
- Tornqvist H, Mills NL, Gonzalez M, Miller MR, Robinson SD, Megson IL, Macnee W, Donaldson K, Soderberg S, Newby DE, et al. (2007) Persistent endothelial dysfunction in humans after diesel exhaust inhalation. *Am J Respir Crit Care Med*; 176 395-400.
- TTL. (2009) Työhygieenisten altistumismittausten rekisteri. Helsinki: Työterveyslaitos.
- TTL. (2015a) Työhygieenisten altistumismittausten rekisteri. Helsinki: Työterveyslaitos.
- TTL. (2015b) HIME - Hiukkaset ja melu kestävässä kaivosympäristössä. Alustavia tuloksia. (*julkaisematon*)
- Ulfvarson U, Alexandersson R, Dahlqvist M, Ekholm U, Bergstrom B. (1991) Pulmonary function in workers exposed to diesel exhausts: the effect of control measures. *Am J Ind Med*; 19 283-9.
- Ulfvarson U (1999). Diesel exhaust - Review of methods of measurements with regard to its health effects. *Occup Hyg*; 5 1-57.
- US EPA. (2002) Health assessment document for diesel engine exhaust. Washington DC: US Environmental Protection Agency.
- Vermeulen R, Silverman DT, Garshick E, Vlaanderen J, Portengen L, Steenland K. (2014) Exposure-response estimates for diesel engine exhaust and lung cancer mortality based on data from three occupational cohorts. *Environ Health Perspect*; 122 172-7.
- Villeneuve PJ, Parent ME, Sahni V, Johnson KC, Canadian Cancer Registries Epidemiology Research G. (2011) Occupational exposure to diesel and gasoline emissions and lung cancer in Canadian men. *Environmental Research*; 111 727-35
- Wheatley AD, Sadhra S. (2004) Occupational exposure to diesel exhaust fumes. *Annals of Occupational Hygiene*; 48 369-76.

- Wierzbicka, A., et al., Detailed diesel exhaust characteristics including particle surface area and lung deposited dose for better understanding of health effects in human chamber exposure studies. *Atmospheric Environment*; 86 212-219.
- YTV. (2008a) Ilmanlaatu ja siihen vaikuttavat tekijät pääkaupunkiseudulla: Ilmansuojelun toimintaohjelmien taustatiedot. Helsinki: YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta.
- YTV. (2008b) Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2007. Helsinki: YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta.

## ASIANTUNTIJAT

Tämän tavoitetasomuistion ovat toimittaneet Piia Taxell, Eija-Riitta Hyytinen, Ilpo Ahonen ja Tiina Santonen, 2015. Dokumentti on päivitetty versio vuonna 2009 julkaistusta dieselpakokaasujen tavoitetasomuistiosta.