

25.3.2021

Dieselpakokaasut (dieselpakokaasuhiukkaset)

SITOVA RAJA-ARVO

Yksilöinti ja ominaisuudet

Dieselpakokaasu on monimutkainen, dieselpolttoaineen palaessa muodostuvien yhdisteiden seos. Dieselpakokaasun kaasufaasin pääkomponentit ovat hiilidioksidi, happi, typpi, vesihöyry, typen oksidit ja hiilimonoksidi. Pääkomponentit kattavat yli 99 % kaasufaasin massasta. Kaasufaasi sisältää lisäksi pieniä määriä rikin oksideita sekä lukuisia orgaanisia yhdisteitä. (US EPA 2002; McDonald ym. 2004)

Dieselpakokaasun hiukkasfaasi koostuu palamisprosessissa muodostuvista primäärisistä hiukkasista sekä kaasufaasiyhdisteiden hapettuessa ja kondensoituessa muodostuvista sekundaarisista hiukkasta. Primääriset pakokaasuhiukkaset koostuvat pääasiassa alkuainehiiltä (dieselnoki) sisältävästä ytimeistä, jonka pinnalle adsorboituu raskaampia orgaanisia yhdisteitä kuten pitkäketjuisia aldehydejä, karboksyylihappoja, polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä (PAH-yhdisteet) ja näiden johdannaisia (US EPA 2002; McDonald ym. 2004). Jälkikäsittelemättömässä dieselpakokaasussa alkuainehiilen (EC) osuus hiukkasten kokonaismassasta on noin 50–75 % ja orgaanisiin yhdisteisiin sitoutuneen hiilen (OC) 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 viimeisten vuosikymmenten aikana (McClellan ym. 2012). Hiukkassuodattimilla ja hapetuskatalysaattoreilla varustettujen dieselajoneuvojen ja -työkoneiden pakokaasun koostumus poikkeaa merkittävästi jälkikäsittelemättömästä dieselpakokaasusta. Keskeisin muutos on pakokaasuhiukkasten massapitoisuuden ja alkuainehiilen osuuden merkittävä väheneminen (McClellan ym. 2012; Hesterberg ym. 2012; Khalek ym. 2011). Myös orgaanisten yhdisteiden ja typen oksidien (NO_x) emissio on uusilla moottori- ja jälkikäsitteilytekniikoilla merkittävästi aikaisempaa vähäisempää (Liu ym. 2010; McDonald ym. 2012). Typpidioksidin (NO₂) osuus typen oksideista voi kuitenkin olla korkeampi kuin vanhemmilla moottorityypeillä.

Esiintyminen, käyttö ja rajoitukset

Tehokkaita ja kestäviä dieselmootoreita käytetään laajasti mm. kuljetuskalustossa, työkoneissa ja sähkögeneraattoreissa. Raskaan liikenteen ajoneuvoista valtaosa on dieselkäyttöisiä. Dieselmootoreita voidaan pakokaasujen vähäisemmän hiilimonoksidipitoisuuden vuoksi hyödyntää myös suljetuissa tiloissa, joissa bensiinikäyttöisiä moottoreita ei voida käyttää. Dieselpakokaasuille voivat työssään altistua mm. kaivos-, rakennus- ja varastotyöntekijät, mekaanikot, ammattikuljettajat, laiva- ja junaliikenteessä työskentelevät, pelastustoimen työntekijät, maa- ja metsätaloudessa työskentelevät sekä jäte- ja ympäristöhuollon työntekijät. (Taxell ja Santonen 2016)

Työterveyslaitoksen vuosina 2010–2020 tekemissä työhygieenisissä selvityksissä työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä mitattu dieselpakokaasuhiukkasten keskipitoisuus alveolijakeen hiukkasten sisältämänä alkuainehiilenä mitattuna oli $0,036 \text{ mg/m}^3$, mediaani $0,016 \text{ mg/m}^3$, 90. persenttiili $0,10 \text{ mg/m}^3$ ja vaihteluväli $<0,003\text{--}0,23 \text{ mg/m}^3$ ($n=26$) (TTL 2020). Kiinteistä pisteistä tehtyjen mittausten ($n=121$) keskipitoisuus oli $0,050 \text{ mg/m}^3$, mediaani $0,007 \text{ mg/m}^3$, 90. persenttiili $0,16 \text{ mg/m}^3$ ja vaihteluväli $<0,001\text{--}1,1 \text{ mg/m}^3$. Mittauksia tehtiin mm. kaivostyössä, ahtauksessa, varastoissa sekä ajoneuvojen katsastuksessa ja huollossa. Korkeimmat hengitysvyöhykepitoisuudet mitattiin maanalaisessa kaivostyössä ja tunnelinrakennustyössä.

Alkuainehiilen keskipitoisuus pääkaupunkiseudun ilmanlaadun mittauspisteissä oli $0,0003\text{--}0,001 \text{ mg/m}^3$ vuonna 2018 ja $0,0002\text{--}0,0008 \text{ mg/m}^3$ vuonna 2019 (musta hiili, PM1) (HSY 2019; 2020). Suurimmat vuorokausikeskiarvot mittauspisteissä olivat $0,001\text{--}0,006 \text{ mg/m}^3$ (2018) ja $0,001\text{--}0,009 \text{ mg/m}^3$ (2019). Suurimmat tuntikeskiarvot olivat $0,002\text{--}0,02 \text{ mg/m}^3$ (2018) ja $0,003\text{--}0,02 \text{ mg/m}^3$ (2019). Tärkeimmät alkuainehiilen päästölähteet pääkaupunkiseudulla ovat dieselajoneuvot ja puun pienpoltto. Etelä-Suomen tausta-asezilla alkuainehiilen pitoisuudet ovat noin 2–5 kertaa alhaisempia kuin pääkaupunkiseudun mittauspisteissä (HSY 2020).

Aineenvaihdunta

Dieselpakokaasulle altistuttaessa valtaosa hengitetyistä pakokaasuhiukkasista pidättyy keuhkojen alveolialueelle, josta hiukkaset poistuvat hyvin hitaasti ylemmäs hengitysteihin syöjäsolujen (makrofagi) kuljettamina. Ylähengitysteiden puhdistusmekanismi (limahissi) poistaa ylempiin hengitysteihin päätyneet hiukkaset nopeasti maha-suolikanavaan. Pakokaasuhiukkaset saattavat myös päätyä alveoleja ympäröivään kudospääliltaan ja mahdollisesti edelleen verenkiertoon. (Taxell ja Santonen 2016)

Pakokaasun kaasufaasin yhdisteistä typpidioksidi pääsee helposti alahengitysteihin. Kaasu liukenee keuhkoepiteelin pinnalla olevaan nestekalvoon muodostaen typpiha-poketta, typpihappoa ja näiden suoloja. Typpidioksidi ja sen muodostamat yhdisteet imeytyvät helposti keuhkoista verenkiertoon. Typpidioksidi poistuu elimistöstä nitraat-tina virtsassa. (US EPA 2008)

Terveysvaikutukset

Ihmisiä koskevat tiedot

Lyhtyaikaisen altistumisen vaikutukset

Dieselpakokaasu voi ärsyttää silmiä ja hengitysteitä. Vapaaehtoisilla tehdyissä ko-keissa kahden tunnin altistuminen dieselpakokaasuille pitoisuudessa 0,1 mg/m³ (hiukkasten kokonaismassa) ja 0,2 ppm NO₂ aiheutti lievää nenän, kurkun ja silmien ärsytystä osalla altistuneista (Mudway ym. 2004). Selviä ärsytysvaikutuksia havaittiin pitoisuudessa 0,3 mg/m³ (hiukkasten kokonaismassa) ja 1,3 ppm NO₂ (Wierzbicka ym. 2014).

Dieselpakokaasualtistumisen välittömiä vaikutuksia hengitysteihin ja verenkiertoeli-mistöön on selvitetty useissa vapaaehtoisilla tehdyissä tutkimuksissa. Terveillä koe-henkilöillä, joita altistettiin 2 tunnin ajan laimennetulle jälkikäsittelemättömälle die-selpakokaasuille pitoisuudessa 0,1 mg/m³ (hiukkasten kokonaismassa) ja 0,2–0,4 ppm NO₂, havaittiin lievä nousu tulehdussolujen (neutrofiilit) määrässä yläkeuhkoput-kien 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 0,25–0,35 mg/m³ (hiukkasten kokonaismassa) (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).

Muutamissa vapaaehtoisilla tehdyissä kokeissa dieselpakokaasuhiukkasten (0,3 mg) annostelu koehenkilöiden sieraimiin samanaikaisesti allergeenien kanssa lisäsi aller-gisen reaktion voimakkuutta (Diaz-Sanchez ym. 1997; 1999). Kahden tunnin die-selpakokaasuallistuminen pitoisuudessa 0,3 mg/m³ (hiukkasten kokonaismassa) ja 0,5 ppm NO₂ voimisti atooppisten koehenkilöiden alahengitysteiden tulehdusreaktiota altistuksen jälkeen annostellulle allergeenille (Carlsten ym. 2016). Altistuminen kah-den tunnin ajan pitoisuudessa 0,1 mg/m³ (hiukkasten kokonaismassa) ja 0,4 ppm NO₂ ei kuitenkaan muuttanut lievästi astmaattisten koehenkilöiden allergista reaktiota samanaikaisesti annostellulle allergeenille (Riedl ym. 2012).

Pitkäaikaisen altistumisen vaikutukset

Työperäinen altistuminen dieselpakokaasuille on liitetty kohonneeseen keuhkosityöpäriskiiin useissa epidemiologisissa tutkimuksissa ja meta-analyyseissä (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). Yhdysvalloissa toteutetussa laajassa kaivos-työntekijöitä koskeneessa tutkimuksessa todettiin keuhkosityöpäkuolleisuuden korreloivan kumulatiiviseen dieselpakokaasu-altistumisen (alkuainehiili, alveolijae) kanssa (Attfield ym. 2012; Silverman ym. 2012; 2014). Keuhkosityöpäkuolleisuuden riskisuhde eniten altistuneessa ryhmässä ($\geq 0,536$ mg/m³-vuotta) oli 2,8 (95 % luottamusväli 1,3–6,3) verrattuna vähiten altistuneeseen ryhmään ($< 0,003$ mg/m³-vuotta).

Vermeulen ym. (2014) tarkasteli dieselpakokaasu-altistumiseen liittyvää keuhkosityöpäriskiä kolmen kvantitatiivista annos-vastetietoa tuottaneen epidemiologisen tutkimuksen pohjalta (Garshick ym. 2002; Silverman ym. 2012; Steenland ym. 1998). Näiden tutkimusten perusteella mallinnetulla kumulatiivisen dieselpakokaasu-altistumisen ja keuhkosityöpäriskin suhdetta kuvaavalla yhtälöllä laskettuna työperäinen altistuminen 45 vuoden ajan dieselpakokaasuille altistumistasoilla 0,001, 0,01 ja 0,025 mg/m³ (alkuainehiili, alveolijae) aiheuttaisi yhteensä 17, 200 ja 689 ylimääräistä syöpäkuolemaa 10 000 työntekijää kohti 80 ikävuoteen mennessä (Vermeulen ym. 2014). Saman aineiston jatkoanalyysissä lisäsyöpäriskiä 4×10^{-5} vastaavaksi altistumistasoksi määritettiin 0,00001–0,00002 mg/m³ (alkuainehiili, alveolijae) ja lisäsyöpäriskiä 4×10^{-3} vastaavaksi tasoksi 0,001–0,002 mg/m³ (alkuainehiili, alveolijae) 40 vuoden työperäisessä altistumisessa (Vermeulen ja Portengen 2016).

Laajassa aikaisempien tapausverrokkitutkimusten aineistot yhdistäneessä tutkimuksessa (16 901 keuhkosityöpätapausta, 20 965 verrokkia) keuhkosityöpäriskin todettiin korreloivan arvioidun dieselpakokaasu-altistumisen kanssa (Ge ym. 2020). Keuhkosityöpäriski kasvoi altistumisajan ja kumulatiivisen dieselpakokaasu-altistumisen (alkuainehiili, alveolijae) kasvaessa, tupakointihistoriasta riippumatta. Keuhkosityöpäriski oli työssään altistumattomiin verrattuna lievästi kohonnut jo alhaisimman kumulatiivisen altistumisen ryhmässä (mediaanialtistuminen 0,011 mg/m³-vuotta; vaihteluväli > 0 –0,022 mg/m³-vuotta; OR 1,09; 95 % luottamusväli 1,00–1,19). Aineiston pohjalta mallinnettu laskennallinen lisäkeuhkosityöpäriski 45 vuoden työperäisessä altistumisessa dieselpakokaasuille altistumistasoilla 0,001, 0,02 ja 0,05 mg/m³ (alkuainehiili, alveolijae) oli 0,04 % (4×10^{-4}), 0,99 % (1×10^{-2}) ja 3,0 % (3×10^{-2}), huomioiden keuhkosityöpän taustaesiintyvyyys eurooppalaisessa väestössä.

Dieselpakokaasu-altistuminen on joissakin epidemiologisissa tutkimuksissa liitetty myös kohonneeseen riskiin sairastua virtsarakon syöpiin (IARC 2014; Koutros ym.

2020). Myös dieselpakokaasualtistumisen yhteydestä sydän- ja verisuonitauteihin on saatu viitteitä muutamissa epidemiologisissa tutkimuksissa (Sjögren ym. 2020).

Eläinkokeiden havainnot

Kahden vuoden toistuva altistuminen dieselpakokaasuille on aiheuttanut rotissa altistumistasosta riippuvia tulehdusmuutoksia keuhkoissa altistumistasoilla $\geq 0,2 \text{ mg/m}^3$ (hiukkasten kokonaismassa) ja voimakkaassa altistumisessa ($\geq 2,2 \text{ mg/m}^3$) myös keuhkosyöpiä (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 keuhkorakkulatiehjeissä altistumistasolla $0,01 \text{ mg/m}^3$ (hiukkaset; $4,2 \text{ ppm NO}_2$) (McDonald ym. 2012; 2015). Vaikutusten arvioitiin johtuvan pääasiassa pakokaasun sisältämästä typpidioksidista. Keuhkosyöpiin viittavia muutoksia ei havaittu. Altistumistasoilla $\leq 0,005 \text{ mg/m}^3$ (hiukkaset; $\leq 0,9 \text{ ppm NO}_2$) ei havaittu altistumiseen liittyviä vaikutuksia keuhkoissa.

Dieselpakokaasut, pakokaasuhiukkaset ja hiukkasista uutetut orgaaniset yhdisteet ovat useissa tutkimuksissa aiheuttaneet genotoksisia vaikutuksia bakteeri- ja soluviljelmässä sekä koe-eläimissä (IARC 2014; Taxell ja Santonen 2016). Kokeessa, jossa hiiriä ja rottia altistettiin yhden, kolmen ja 24 kuukauden (rotat) ajan modernin dieselmoottorin jälkikäsitellyille pakokaasuille altistumistasoilla $\leq 0,01 \text{ mg/m}^3$ (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 dieselmoottoreiden jälkikäsittelemättömille pakokaasuille on liitetty sydän- ja verisuonivaikutuksiin, hengitystieallergeenien vaikutuksia voimistaviin vaikutuksiin, neuroinflammatorisiin vaikutuksiin sekä lisääntymisterveydelle haitallisiin vaikutuksiin. (Taxell ja Santonen 2016)

Dieselpakokaasun riskinarviointeja

Kansainvälinen syöväntutkimuslaitos IARC (International Agency for Research on Cancer) on luokitellut dieselpakokaasut ihmisessä syöpää aiheuttavaksi (ryhmä 1) perustuen näyttöön dieselpakokaasualtistumisen ja lisääntyneen keuhkosyöpäriskin kausaalista yhteydestä ihmisissä (IARC 2014).

Saksalainen raja-arvokomitea (AGS) asetti vuonna 2017 dieselpakokaasuhiukkasten 8 tunnin raja-arvoksi Saksassa $0,05 \text{ mg/m}^3$ (alkuainehiili, alveoliijae) (AGS 2017).

Raja-arvo perustui rotilla ja hiirillä tehtyyn kahden vuoden hengitystiealtistumiskokee-

seen (Mauderly et al. 1987), jossa ei todettu muutoksia eläinten keuhkoissa alhaisimmalla altistumistasolla noin $0,2 \text{ mg/m}^3$ alkuainehiilenä mitattuna (NOEAC). Raja-arvoehdotus laskettiin kahdella tavalla: 1) huomioiden erot hiukkasten pidättymisessä rotan ja ihmisen keuhkoihin (arviointikerroin 1,2) ja ihmisten väliset herkkyyserot (kerroin 3) ($\Rightarrow 0,07 \text{ mg/m}^3$) ja 2) huomioiden näiden lisäksi myös erot altistumisajassa ja hengitysvolyymissä (kerroin 1,7) ($\Rightarrow 0,03 \text{ mg/m}^3$). Komitea arvioi eläinkokeiden perusteella keuhkosyöpäriskin ehdotetulla raja-arvotasolla $0,05 \text{ mg/m}^3$ (alkuainehiili, alveolijae) olevan vähäinen ($< 4 \times 10^{-4}$). Komitea ei huomioinut raja-arvoehdotuksessaan dieselpakokaasualtistumiseen liittyviä epidemiologisia tutkimuksia, koska katsoi, etteivät ne ole riittävän luotettavia annos-vastesuhteiden kvantitatiiviseen arviointiin (AGS 2017).

Hollantilainen asiantuntijakomitea DECOS (Dutch Expert Committee on Occupational Safety) arvioi vuonna 2019, että dieselpakokaasu on genotoksinen syöpävaarallinen altiste, jolle ei voida määrittää turvallista altistumistasoa (DECOS 2019). DECOS laski epidemiologisten tutkimusten (Vermeulen ym. 2014) perusteella dieselpakokaasuille syöpäriskiin perustuvat vertailupitoisuudet (HBC-OCR): pitoisuus $0,001 \text{ mg/m}^3$ (alkuainehiili, alveolijae) vastaisi 4 ylimääräistä keuhkosyöpää 1000 altistunutta kohti 40 vuoden työperäisessä altistumisessa (4×10^{-3} ; riskitaso, jota ei saisi ylittää) ja pitoisuus $0,00001 \text{ mg/m}^3$ (alkuainehiili, alveolijae) 4 ylimääräistä keuhkosyöpää 100 000 altistunutta kohti 40 vuoden työperäisessä altistumisessa (4×10^{-5} ; hyväksyttävä riskitaso) (DECOS 2019). Huomioiden DECOS:n arvion, dieselpakokaasujen taustapitoisuudet sekä raja-arvon teknisen saavutettavuuden, Hollannin työympäristöasioita käsittelevä komitea päätyi asettamaan dieselpakokaasujen työhygieeniseksi raja-arvoksi Hollannissa $0,01 \text{ mg/m}^3$ (8 h keskiarvopitoisuus; alkuainehiili, alveolijae) 1.7.2020 alkaen (SER 2020). Mahdollisuutta raja-arvon alentamiseen tarkastellaan uudelleen vuonna 2024.

Tanskan työympäristötutkimuslaitos NFA (Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø) arvioi dieselpakokaasualtistumiseen liittyvän syöpäriskin taustalla olevan sekä suoraa (hiukkasten sisältämiin DNA-reaktiivisiin yhdisteisiin liittyviä) että epäsuoria (tulehdukseen/oksidatiiviseen stressiin liittyviä) genotoksisuuden mekanismeja ja totesi, ettei altisteen genotoksisilla ja karsinogeenisilla vaikutuksilla ole annoskynnystä (NFA 2018). NFA laski epidemiologisten tutkimusten (Vermeulen ym. 2014) perusteella pitoisuuden $0,00045 \text{ mg/m}^3$ (alkuainehiili, alveolijae) vastaavan 1 ylimääräistä syöpää 1000 altistunutta kohti (riskitaso 1×10^{-3}) 45 vuoden työperäisessä altistumisessa. Tanskassa on dieselpakokaasuille voimassa raja-arvo $0,05 \text{ mg/m}^3$ (8 h keskiarvopitoisuus; alkuainehiili, alveolijae) (BM 2021). Raja-arvon mahdollisesta alentamisesta keskustellaan.

Sitova raja-arvo

Useat epidemiologiset tutkimukset liittävät altistumisen (jälkikäsittelemättömälle) dieselpakokaasulle lisääntyneeseen keuhkosityöpäriskiiin. Epidemiologisten tutkimusten perusteella arvioitu lisäkeuhkosityöpäriski altistumistasolla $0,001 \text{ mg/m}^3$ (alkuainehiili, alveolijae) koko työuran kestävässä altistumisessa on $\geq 1 \times 10^{-4}$ (Ge ym. 2020; Vermeulen ym. 2014; Vermeulen ja Portengen 2016; DECOS 2019). Altistumistasolla $0,05 \text{ mg/m}^3$ laskennallinen lisäkeuhkosityöpäriski on jo $> 1 \times 10^{-2}$. Keuhkosityöpäriskin arviointiin erityisesti alhaisilla altistumistasoilla liittyy kuitenkin huomattavia epävarmuuksia.

Dieselpakokaasujen karsinogeenisuuden on arvioitu liittyvän sekä pakokaasuhiukkasiin sitoutuneiden yhdisteiden (mm. PAH-yhdisteet) aiheuttamiin suoriin genotoksisiin vaikutuksiin, että altistumisen aiheuttamiin tulehdusvaikutuksiin ja oksidatiiviseen stressiin keuhkoissa (Taxell ja Santonen 2016). Jälkikäsitellyn dieselpakokaasun terveysvaikutuksiin liittyvää tutkimustietoa on saatavilla vasta vähän, mutta pakokaasuhiukkasten massapitoisuuden ja alkuainehiilen osuuden sekä orgaanisten yhdisteiden emission merkittävä väheneminen pakokaasun jälkikäsitelyssä todennäköisesti vähentää altistumiseen liittyvää syöpäriskiä.

Dieselmoottorien pakokaasuille on asetettu sitova raja-arvo $0,05 \text{ mg/m}^3$ (alkuainehiili, alveolijae; 8 tunnin vertailuaika) (Vna 1267/2019). Raja-arvoa sovelletaan 21.2.2023 alkaen lukuun ottamatta maanalaista kaivostoimintaa ja tunnelirakentamista, jossa arvoa sovelletaan 21.2.2026 alkaen. Raja-arvo perustuu työntekijöiden suojelemisesta syöpäsairauden vaaraa aiheuttavilta tekijöiltä työssä annettuun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviin 2004/37/EY. Koko työuran (40 vuotta) kestävä työperäinen altistuminen dieselpakokaasuille sitovan raja-arvon tasolla vastaa epidemiologisten tutkimusten perusteella laskennallista lisäsyöpäriskiä $> 1 \times 10^{-2}$ (eli > 10 syöpätapausta/1000 työntekijää) (Ge ym. 2020; Vermeulen ym. 2014; Vermeulen ja Portengen 2016; DECOS 2019).

Korkean laskennallisen syöpäriskin vuoksi EU:n sitovaa raja-arvoa vastaava dieselpakokaasujen sitova raja-arvo ei riittävällä tavalla suojaa työntekijöiden terveyttä. Mahdollisuutta raja-arvon alentamiseen kansallisesti tullaan siksi tarkastelemaan uudelleen raja-arvon voimaantulon mennessä, huomioiden altistumisen hallintaan liittyvät tekniset reunaehdot eri toimialoilla.

Dieselpakokaasualtistumiseen liittyviä terveysriskejä arvioitaessa tulee lisäksi huomioida typpidioksidin HTP-arvo $0,5 \text{ ppm}$ (8 tunnin vertailuaika) ja 1 ppm (15 min vertailuaika).

Eri asettajien ilman epäpuhtauksien vertailu

Eri maissa on voimassa seuraavanlaisia työilman pitoisuuden raja-arvoja dieselpako-kaasuille (alkuainehiili, alveolijae).

Asettaja	Vuosi*	Vertailuaika				Huom.
		8 h		15 min		
		ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	
EU (BOELV)	2023	-	0,05	-	-	
Saksa (AGS)	2017	-	0,05	-	-	
Hollanti	2020	-	0,01			
Tanska	2021	-	0,05			
Sveitsi		-	0,3 0,1	-	1,2 0,4	maalainen kaivostoiminta; muut työt (tekni- nen raja-arvo)
Suomi (sitova raja-arvo)	2023**	-	0,05	-	-	

(IFA 2021; SER 2020; BM 2021)

* Raja-arvon voimaantulovuosi (jos tiedossa).

** Maanalaisessa kaivostoiminnassa ja tunnelirakentamisessa 2026.

Viitteet

AGS (2017). Begründung zu Dieselmotoremissionen (DME) in TRGS 900. Ausschuss für Gefahrstoffe, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Berlin.

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: 869-883.

Barath S, Mills NL, Lundback M, Tornqvist H, Lucking AJ, Langrish JP, Soderberg S, Boman C, Westerholm R, Londahl J, ym. (2010). Impaired vascular function after exposure to diesel exhaust generated at urban transient running conditions. *Part Fibre Toxicol*; 7: 19.

Behndig AF, Larsson N, Brown JL, Stenfors N, Helleday R, Duggan ST, Dove RE, Wilson SJ, Sandstrom T, Kelly FJ, ym. (2011). Proinflammatory doses of diesel exhaust in healthy subjects fail to elicit equivalent or augmented airway inflammation in subjects with asthma. *Thorax* 66: 12-19.

Behndig AF, Mudway IS, Brown JL, Stenfors N, Helleday R, Duggan ST, Wilson SJ, Boman C, Cassee FR, Frew AJ, ym. (2006). Airway antioxidant and inflammatory responses to diesel exhaust exposure in healthy humans. *Eur Respir J*; 27: 359-365.

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* 166: 69-82; discussion 141-171.

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: 125-157.

BM (2021). Bekendtgørelse om grænseværdier for stoffer og materialer. BEK nr 209 af 13/02/2021. Beskæftigelsesministeriet, København.

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. Elsevier Science Publishers B. V., Tsukuba Science City.

Carlsten C, Blomberg A, Pui M, ym. (2016). Diesel exhaust augments allergen-induced lower airway inflammation in allergic individuals: a controlled human exposure study. *Thorax* 71(1): 35-44.

DECOS (2019) Diesel engine exhaust: Health-based recommended occupational exposure limit. Dutch Expert Committee on Occupational Safety, Health Council of The Netherlands, The Hague.

Diaz-Sanchez D, ym. (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: 2406-2413.

Diaz-Sanchez D, ym. (1999). Nasal challenge with diesel exhaust particles can induce sensitization to a neoallergen in the human mucosa. *J Allergy Clin Immunol* 104: 1183-1188.

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: 1301-1306.

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: 1327-1332.

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. Health Effects Institute, Boston (MA).

Ge C, Peters S, Olsson A, ym. (2020). Diesel Engine Exhaust Exposure, Smoking, and Lung Cancer Subtype Risks. A Pooled Exposure-Response Analysis of 14 Case-Control Studies. *Am J Respir Crit Care Med* 202(3): 402-411.

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: 163-184.

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. *Inhal Toxicol* 24: 1-45.

HSY (2019). Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2018. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki.

HSY (2020). Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2019. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki.

IARC (2014). Diesel and gasoline engine exhaust and some nitroarenes. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 105. International Agency for Research on Cancer, Lyon.

IFA (2021). GESTIS International Limit Values. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin. Saatavissa: <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-internationale-grenzwerte-fuer-chemische-substanzen-limit-values-for-chemical-agents> (viitattu 17.3.2021)

Ishihara Y, Kagawa J (2003). Chronic diesel exhaust exposures of rats demonstrate concentration and time-dependent effects on pulmonary inflammation. *Inhal Toxicol* 15: 473-492.

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. *Inhal Toxicol* 12: 469-490.

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. *J Air Waste Manag Assoc* 61: 427-42.

Koutros S, Kogevinas M, Friesen MC, ym. (2020). Diesel exhaust and bladder cancer risk by pathologic stage and grade subtypes. *Environ Int* 135: 105346.

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: 911-919.

Lipsett M, Campleman S (1999). Occupational exposure to diesel exhaust and lung cancer: a meta-analysis. *Am J Public Health* 89 1009-1017.

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. *Atmos Environ*; 44: 1108-1115.

Lucking AJ, Lundback M, Barath SL, Mills NL, Sidhu MK, Langrish JP, Boon NA, Pourazar J, Badimon JJ, Gerlofs-Nijland ME, ym. (2011). Particle traps prevent adverse vascular and prothrombotic effects of diesel engine exhaust inhalation in men. *Circulation* 123: 1721-1728.

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: 208-221.

McClellan RO, Hesterberg TW, Wall JC (2012). Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology. *Regulat Toxicol Pharmacol* 63: 225-258.

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. *Environ Sci Technol* 38: 2513-2522.

McDonald JD, Doyle-Eisele M, Gigliotti A, Miller RA, Seilkop S, Mauderly JL, Seagrave J, Chow J, Zielinska B, HEIHRC (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 141-171.

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: 2660-2671.

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: 3930-3936.

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: 200-212.

NFA (2018). Diesel exhaust particles: Scientific basis for setting a health-based occupational exposure limit. National Research Centre for the Working Environment, Copenhagen.

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: 941-948.

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. *Occup Environ Med* 69: 787-792.

Riedl MA ym. (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.

SER (2020). Regeling van de Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid van 2 juni 2020, nr. 2020-0000068933, tot wijziging van Bijlage XIII van de Arbeidsomstandighedenregeling in verband met de invoering van een wettelijke grenswaarde voor dieselmotoremissie. Staatscourant nr. 30304. De Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, Den Haag.

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, ym. (2012). The Diesel Exhaust in Miners study: a nested case-control study of lung cancer and diesel exhaust. *J Natl Cancer Inst* 104: 855-868.

Sjögren B, Bigert C, Gustavsson P (2020). The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals. 153. Occupational chemical exposures and cardiovascular disease. *Arbete och Hälsa* 54(2): 1-428.

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, Anskait E, Rustemeier K, Schepers G, Schnell P, Hausmann 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. *Inhalat Toxicol* 17: 549-576.

Taxell P, Santonen T (2016). 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* 49(6): 1-147.

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 (2020). Työhygieenisten altistumismittausten rekisteri. Työterveyslaitos, Helsinki.

US EPA (2002). Health assessment document for diesel engine exhaust. US Environmental Protection Agency, Washington DC.

US EPA (2008). Integrated science assessment for oxides of nitrogen – health criteria. EPA/600/R08/071. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park (NC).

Vermeulen R, Portengen L (2016). Is diesel equipment in the workplace safe or not? *Occup Environ Med* 73: 846-848.

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: 172-177.

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. *Environ Res* 111: 727-735.

Wierzbicka A, ym. (2014). Detailed diesel exhaust characteristics including particle surface area and lung deposited dose for better understanding of health effects in human chamber exposure studies. *Atmos Environ* 86: 212-219.