

5.2.2026

Lyijy ja sen epäorgaaniset yhdisteet

SITOVAN RAJA-ARVON JA BIOLOGISTEN NÄYTTEIDEN SITOVAN RAJA-ARVON PERUSTELUMUISTIO

Yksilöinti ja ominaisuudet

Lyijy (metalli)

<i>CAS-numero:</i>	7439-92-1
<i>EY-numero:</i>	231-100-4
<i>Kaava:</i>	Pb
<i>Molekyylipaino:</i>	207,2 g/mol
<i>Sulamislämpötila:</i>	327,4 °C
<i>Kiehumislämpötila:</i>	1 740 °C
<i>Höyrynpaine:</i>	236 Pa mmHg (1000 °C)
<i>Muuntokerroin (veren lyijy):</i>	1 µmol/l = 207 µg/l

Lyijy (Pb) on sinertävän hopeanharmaa, pehmeä metalli. Matalan höyrystymislämpötilansa vuoksi lyijyä sisältäviä metalliseoksia kuumennettaessa (esimerkiksi hitsaus ja polttoleikkaus) syntyy helposti lyijyhuuruja, jotka muodostavat lyijyoksidia lämpötiloissa 550–600 °C. Lyijy on vastustuskykyistä korroosiolle ja veteen liukenematonta, mutta liukenee typpihappoon ja kuumaan rikkihappoon. Lyijysuolojen liukenevuus veteen vaihtelee. Lyijysulfidi ja lyijyoksidit ovat niukkaliukoisia, mutta lyijynitraatti, -klooraatti ja -kloridi ovat suhteellisen vesiliukoisia.

Esimerkkejä epäorgaanisista lyijy-yhdisteistä ja niiden CLP-asetuksen (1272/2008/EY) mukaisista vaaraluokituksista on esitetty alla.

Lyijyjauhe (hiukkasten halkaisija < 1mm): Repr. 1A, H360FD; Lact. H362; Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 1, H410.

Lyijy massiivimuodossa (hiukkasten halkaisija > 1mm): Repr. 1A, H360FD; Lact. H362.

Lyijymonoksidi (PbO), CAS 1317-36-8: Acute Tox. 4, H302, H332; Repr. 1A, H360Df; STOT RE 2, H373; Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 1, H410.

Tetralyijytrioksidisulfaatti (Pb₄O₃(SO₄)), CAS 12202-17-4: Acute Tox. 4, H302, H332; Repr. 1A, H360Df; STOT RE 2, H373; Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 1, H410.

Pentalyijytetraoksidisulfaatti (Pb₅O₄(SO₄)), CAS 12065-90-6: Acute Tox. 4, H302, H332; Repr. 1A, H360Df; STOT RE 2, H373; Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 1, H410.

Lyijytetroksidi (Pb₃O₄), CAS 1314-41-6: Acute Tox. 4, H302, H332; Repr. 1A, H360Df; STOT RE 2, H373; Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 1, H410.

[Valmistajien ja maahantuojien ehdottamat luokitukset löytyvät tästä linkistä.](#)

Esiintyminen, käyttö ja rajoitukset

Lyijyä esiintyy luonnostaan sulfidi- tai happimineraaleissa (ECHA 2020a). Lyijy voi olla joko metallisessa muodossa tai hapettuneena +2- tai +4-muodossa yhdisteissä. Epäorgaaninen lyijy on usein kaksiarvoista ja orgaaniset lyijy-yhdisteet neliarvoisia.

Lyijyä vapautuu ympäristöön myös ihmisten toiminnan seurauksena, kuten kaivostoiminnassa, metallien valmistuksessa ja akkujen valmistuksessa (ECHA 2020a). Lyijyä saadaan usein sivutuotteena muiden metallien, kuten sinkin, hopean tai kuparin tuotannossa. Kaikista käytetyistä lyijy-yhdisteistä epäorgaaniset lyijy-yhdisteet kattavat yli 99 %. Metallinen lyijy, lyijymonoksidi (PbO), tetralyijytrioksidisulfaatti (Pb₄O₃(SO₄)), pentalyijytetraoksidisulfaatti (Pb₅O₄(SO₄)) ja lyijytetraoksididi (Pb₃O₄) kattavat valtaosan (n. 97 %) kaikesta käytetystä epäorgaanisesta lyijystä Euroopassa (ECHA 2020a).

Lyijyhappoakat, joita valmistetaan autoteollisuudelle, ovat keskeinen lyijy-yhdisteiden käyttökohde (ECHA 2020a). PVC-muovin stabilointiaineissa on käytetty lyijy-yhdisteitä, mutta niiden käyttö esineissä on rajoitettu 0,1 painoprosenttiin marraskuusta 2024 alkaen (EC 2023/923). Lasituotteissa lyijyn käyttökohteita ovat kristallilasi, röntgensäteiden suojaukseen käytetyt tuotteet sekä optiset lääkinälliset laitteet ja mikroskoopit. Metalliseoksissa lyijyä käytetään elektronisiin liittimiin ja laakereihin erityisesti autoteollisuudessa. Juotosmateriaaleissa voidaan vielä joissain tapauksissa

käyttää tina-lyijyseoksia. Lyijylevyjä käytetään rakennusmateriaalina mm. kemianteollisuudessa, koska aine suojaa kemikaaleilta ja säteilyltä sekä vaimentaa värinää ja ääntä. Lyijyä käytetään myös ammuksissa. Lyijypigmenttejä on aikaisemmin käytetty maaleissa, mikä tulee huomioida museo- ja restaurointityössä.

Turvallisuus- ja kemikaaliviraston (Tukes) kemikaalituoterekisterin mukaan metallisen lyijyn valmistus- ja maahantuontimäärä Suomessa oli noin 30 000 tonnia vuonna 2023. Muita lyijy-yhdisteitä maahantuontiin hyvin pieniä määriä. Lyijyä sisältävät kemikaalituoterekisteriin ilmoitetut tuotteet olivat pääasiassa juotosmateriaaleja, akkujen elektrolyyttiliuoksia ja rikasteita.

Työterveyslaitoksen vuosina 2016–2022 tekemissä työhygieenisissä selvityksissä työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä mitattu hengittyvän lyijyn keskipitoisuus oli 0,0006 mg Pb/m³, mediaani 0,0004 mg Pb/m³, 90. persentiili 0,03 mg Pb/m³ ja vaihteluväli <0,00002–1,2 mg Pb/m³ (n=235) (TTL 2023a). Korkeita lyijypitoisuuksia mitattiin erityisesti metallien kierrätyksessä ja rikastamoilla.

Työterveyslaitoksen biologisten altistumismittausten rekisterissä on 2519 kappaletta veren lyijypitoisuuden mittauksia ajanjaksolta 1/2019–5/2022 (TTL 2023b). Mitattujen pitoisuuksien mediaani oli 18 µg/l (0,087 µmol/l) ja 90. persentiili 87 µg/l (0,42 µmol/l). Nykyinen altistumattomien viiteraja (13 µg/l) ylittyi 63 % näytteistä. Korkeita pitoisuuksia mitattiin erityisesti valimoteollisuudessa sekä ammusten valmistuksessa ja ammateissa, joihin liittyy ampumisharjoittelua.

Polttoaineen lyijykiellon astuttua voimaan lyijyn taustapitoisuudet ympäristössä ja väestössä ovat laskeneet selvästi (ECHA 2020a, Lacerda et al. 2023). Nykyisin väestön altistuminen tapahtuu pääasiassa ruuan ja juoman välityksellä. Muita merkittäviä altistumlähteitä ovat ampumaharrastus (ATSDR 2020) ja etenkin lapsilla myös lyijyammuksilla metsästetyn riistalihan syönti (Gerofke et al. 2018). Myös tupakointi on osassa tutkimuksia liitetty korkeampaan lyijyn taustapitoisuuteen veressä (Nisse et al. 2017; Hoet et al. 2021).

Työterveyslaitoksen vuosina 2020–21 toteuttamassa selvityksessä suomalaisten työssään altistumattomien työntekijöiden (n=143) veren lyijypitoisuuden 95. persentiili oli 12,8 µg/l (0,06 µmol/l) (Porras et al. 2025). Tästä selvityksestä johdettiin altistumattomien viiterajaksi 13 µg/l (0,06 µmol/l).

Aineenvaihdunta

Työntekijät altistuvat lyijylle pääasiassa hengitysteiden kautta, mutta myös käsistä suuhun -altistumista tapahtuu (ECHA 2020a). Ihon kautta epäorgaaninen lyijy imeytyy

heikosti. Epäorgaanisen lyijyn pienet, alle 2,5 µm hiukkaset, imeytyvät hengitysteistä lähes täydellisesti, mutta suuremmat hiukkaset voivat siirtyä liman mukana suunieluun ja päätyä nieltäväksi (ATSDR 2020). Niukkaliukoisten lyijy-yhdisteiden imeytyminen voi kuitenkin olla heikompaa ja ne voivat mahdollisesti kertyä keuhkoihin (ECHA 2020).

Ruuan sulatuskanavasta vesiliukoisesta lyijystä imeytyy 3–10 prosenttia. Lapsilla imeytyminen ruuan sulatuskanavasta on suurempaa kuin aikuisilla; jopa 40–50 prosenttia niellystä lyijystä imeytyy (ATSDR 2020).

Verenkierrossa pääosa lyijystä (96–99 %) on punasolujen proteiineihin sitoutuneena (ECHA 2020a). Lyijypitoisuuden noustessa merkittävästi punasoluihin sitoutuminen saturaatioituu, jolloin lyijyä on enemmän plasmassa (ATSDR 2020). Plasmasta lyijy jakautuu pehmytkudoksiin ja luustoon (ATSDR 2020; ECHA 2020a). Jakautuminen tapahtuu samalla tavalla imeytymisreitistä riippumatta. Luustoon kertynyt lyijy voi vapautua myöhemmin, mikä voi nostaa veren lyijypitoisuutta myöhemmin esimerkiksi kalsiuminpuutoksen tai osteoporoosin seurauksena. Myös raskaus- ja imetysaikana lyijyä voi vapautua luustovarastosta takaisin verenkiertoon kalsiumin aineenvaihduntaa seuraten (ATSDR 2020). Verenkierrossa oleva lyijy läpäisee istukan, ja vastasyntyneen napaveressä lyijypitoisuus on lähellä äidin veren lyijypitoisuutta. Istukan lisäksi lyijy läpäisee myös veri-aivoesteeseen.

Lyijy ei metaboloidu elimistössä. Lyijy erittyy elimistöstä pääasiassa virtsan kautta (75–80 %) ja vähemmän ulosteiden, äidinmaidon, hien, kynsien ja hiusten kautta (ECHA 2020a). Lyijyn varastoitua pehmytkudosksiin ja luustoon on sen poistuminen monivaiheista. Veren lyijyn puoliintumisaika on 29–36 päivää, pehmytkudoksista lyijy puoliintuu 1,2 vuodessa ja luustosta keskimäärin 13 vuodessa (ECHA 2020a). Lyijyn puoliintumisaika luustosta voi kuitenkin vaihdella yksilöiden välillä hyvinkin voimakkaasti (2,3–27 vuotta) (Schutz et al. 1987). Lyijyn poistuminen on nopeampaa matalammilla veren lyijypitoisuuksilla kuin korkeammilla (OEHHA 2013). Myös akuutin altistumisen jälkeen lyijyn poistuminen elimistöstä on nopeampaa kuin jos sama määrä on kumuloitunut elimistöön pidemmän ajan kuluessa (Schutz et al. 1987). Tällöin suhteessa suurempi määrä elimistön lyijystä on luustossa, josta se poistuu hitaammin.

Terveysvaikutukset

Ihmisiä koskevat tiedot

Akuutit vaikutukset

Akuutin lyijymyrkytyksen oireita ovat mahakipu, pahoinvointi, ummetus, ripuli, metallinen maku suussa, päänsärky, jano, ärtyneisyys, alentunut aktiivisuus, puutuneisuus, lihasheikkous ja -kipu, alentunut tajunnan taso, hemoglobiillisyynteesin häiriintyminen, aivojen turvotus ja enkefalopatia, joka voi johtaa koomaan ja jopa kuolemaan (ATSDR 2020).

Myrkytysoireita akuutissa lyijyaltistumisessa on tapaustutkimusten mukaan tyypillisesti esiintynyt veren lyijypitoisuuksilla >300 µg/l (ATSDR 2020). Oireet pahenevat veren lyijypitoisuuden kasvaessa. Enkefalopatiaa on havaittu veren lyijypitoisuuksilla >1000 µg/l. Lapset ovat herkempiä lyijyn toksisille vaikutuksille lyijyn voimakkaamman imeytymisen ja kehittymättömän hermoston vuoksi. Lisäksi vaikutukset lapsilla voivat olla pidempiaikaisia (ATSDR 2020).

Ääreishermostovaikutukset

Ääreishermoston hermojohtumisen hidastumista raajojen hermoissa on todettu työssään lyijylle altistuneilla veren lyijypitoisuuksilla 330–640 µg/l (Krieg et al. 2008, Aktürk et al. 2022). Tutkimuksessa, jossa selvitettiin ääreishermostojen johtumisnopeutta lyijylle altistavassa työssä äskettäin aloittaneilla (n=328), ei havaittu yhteyttä veren lyijypitoisuuden ja hermojohtumishäiriöihin välillä, kun keskimääräinen veren lyijypitoisuus työntekijöillä oli 45 µg/l (Yu et al. 2019).

Neurobehavioraaliset vaikutukset

Työperäisen lyijyaltistumisen neurologisia vaikutuksia on tutkittu useissa tutkimuksissa ja meta-analyseissa. Neurobehavioraalisia vaikutuksia on havaittu veren lyijypitoisuuksilla 107–520 µg/l (Seeber et al. 2002, Krieg et al. 2005, Meyer-Baron ja Seeber 2000, Schwartz et al. 2001 and 2005). Havaitut vaikutukset ovat olleet heikentymistä oppimisessa, muistissa, psykomotorisissa taidoissa ja keskittymisessä sekä näköaistin vastaanottaman tiedon käsittelyssä.

Murata et al. (2009) katsausartikkelissaan totesivat, että palautuvia neurotoksisia vaikutuksia lyijylle altistuneilla työntekijöillä oli havaittavissa veren lyijypitoisuudella 107–175 µg/l.

Schwartz et al. (2005) tutkivat lyijyn pitkäaikaisia sekä lyhytaikaisia vaikutuksia lyijylle työssään altistuvilla (n=576), joiden keskimääräinen veren lyijypitoisuus oli 314 ± 142 $\mu\text{g/l}$ ja luun lyijypitoisuus 38 ± 43 $\mu\text{g/g}$. He havaitsivat viimeaikaisen lyijyaltistumisen heikentävän toiminnanohjausta ja manuaalista näppäryyttä. Pitkäaikaisen altistumisen havaittiin heikentävän ääreishermoston signaalien tulkintaa ja toiminnanohjausta sekä lisäävän neuropsykiatrisia oireita.

Schwartz et al. (2001) lyijytyöntekijöillä tekemässä tutkimuksessa (n=938) todettiin veren lyijypitoisuuden korreloivan heikompaan suoriutumiseen neurobehavioraalisissa testeissä, erityisesti kognitiivista kyvykkyyttä, manuaalista näppäryyttä ja perifeeristä motorista voimaa mittaavissa kokeissa. He määrittivät korkeimmaksi haittaa aiheuttamattomaksi tasoksi (NOAEL) 180 $\mu\text{g/l}$, vaikka joitakin lieviä muutoksia oli nähtävissä jo tällä tasolla. Schwartz et al. (2001) määrittämää NOAEL-tasoa voidaan pitää luotettavimpana arviona neurobehavioraalisille vaikutuksille työntekijöillä tutkimuksen suuren osallistujamäärän vuoksi (ECHA 2020a).

Munuaisvaikutukset

Lyijy aiheuttaa munuaisfunktion laskua ja edesauttaa kroonisen munuaissairauden syntymistä (ATSDR 2020; ECHA 2020a). Munuaisvaikutuksia on havaittu väestötasolla jo alle 100 $\mu\text{g/l}$ veren lyijypitoisuuksilla, ja mitä korkeampi lyijypitoisuus on ollut, sitä vakavampia munuaishaittoja on todettu (ATSDR 2020). Alle 100 $\mu\text{g/l}$ veren lyijypitoisuudella on havaittu munuaiskeräsen suodattumisnopeuden (GFR) muutoksia, yli 100 $\mu\text{g/l}$ veren lyijypitoisuudella entsyymi- ja valkuaisvirtsaaisuutta, yli 500 $\mu\text{g/l}$ pitoisuuksilla vakavia munuaisten toimintahäiriöitä ja patologisia muutoksia.

Työntekijöillä tehdyissä tutkimuksissa munuaisvaikutukset eivät ole olleet yhtä selkeästi havaittavissa ja tulokset ovat olleet epä johdonmukaisempia (ECHA 2020a). Tulosten epä johdonmukaisuuteen voi vaikuttaa muun muassa pieni tutkittavien määrä ja tilastotieteen rajoittuneisuus verrattuna laajoihin väestötutkimuksiin, sekä se, että työntekijät ovat yleensä terveempiä kuin väestö keskimäärin. Joissakin työntekijätutkimuksissa altistuminen lyijyn lisäksi myös kadmiumille on saattanut vaikuttaa tuloksiin (Ekong et al. 2006). Työntekijätutkimuksissa, joissa munuaisvaikutuksia on havaittu, munuaisten suodatusnopeus oli heikentynyt veren lyijypitoisuuksilla 290 $\mu\text{g/l}$ (Karimooy et al. 2010; Khan et al. 2008).

Tutkimuksissa, joissa seerumin kreatiniinia käytettiin markkerina munuaisten toiminnalle, tulokset olivat vaihtelevia (ECHA 2020a). Poikittaistutkimuksissa veren lyijypitoisuuksilla 400 – 700 $\mu\text{g/l}$ havaittiin seerumin kreatiniinin nousua, mutta pitoisuuksilla 390 $\mu\text{g/l}$ muutoksia ei havaittu (Hernández-Serrato et al. 2006; Onuegbu

et al. 2011; Orisakwe et al. 2007). Pitkittäistutkimuksessa veren lyijypitoisuus on liitetty kreatiniinipitoisuuden muutokseen (Weaver et al. 2009, Hsiao et al. 2001).

Lyijy saattaa vaikuttaa varhaisena munuaisvaikutuksien biomarkkerina pidetyn N-asetyyli- β -D-glukosaminidaasin (NAG) pitoisuuteen, ja delta-aminolevulinaatti dehydrataasi (ALAD) -geenin polymorfia voi herkistää lyijyn vaikutuksille (Gao et al. 2020, EHCA 2020). Lin ja Tai-Yi (2007) määrittivät NAG-muutoksille lyijylle altistuneilla työntekijöillä BMDL₁₀-tason 253 $\mu\text{g/l}$ (veren lyijypitoisuus, jossa haittavaikutuksen esiintyvyys on 95 % todennäköisyydellä alle 10 %).

Työntekijätutkimuksissa ei ole havaittu lyijyllä olevan yhteyttä krooniseen munuaissairauteen, eikä annos-vastesuhdetta ole havaittu myöskään munuaissairauskuolleisuuteen (ECHA 2020a).

Kardiovaskulaariset vaikutukset

Väestötasolla veren lyijypitoisuudella on havaittu yhteys korkeampaan systoliseen ja diastoliseen verenpaineeseen ja suurentuneeseen kohonneen verenpaineen riskiin jo veren lyijypitoisuuksilla alle 100 $\mu\text{g/l}$ (ATSDR 2020). Veren lyijypitoisuuden kaksinkertaistuminen on nostanut systolista verenpainetta noin 1–3,25 mmHg ja diastolista verenpainetta noin 0,6 mmHg (Tsoi et al. 2021, Nawrot et al. 2002).

Työssään lyijylle altistuvien veren lyijypitoisuuden kaksinkertaistuminen ei nostanut verenpainetta, kun verenlyijypitoisuus työtä aloitettaessa oli keskimäärin 41 $\mu\text{g/l}$ ja toisen vuoden kohdalla 135 $\mu\text{g/l}$ (n=267) (Yu et al. 2022). Lievää, normaaliarvojen sisällä pysyvää verenpaineen nousua on työssään altistuvilla todettu veren lyijypitoisuuksilla noin 300 $\mu\text{g/l}$ (ECHA 2020a). Verenpaineen nousu normaaliarvojen sisällä ei itsessään ole haittavaikutus, mutta voi nostaa riskiä sydän- ja verisuonisairauksille sekä aivoverenkierron häiriöille (ECHA 2020a; Glenn et al. 2006). Vaikka väestötasolla on verenpaineen nousua havaittu jo alle 100 $\mu\text{g/l}$ veren lyijypitoisuuksilla, ei työntekijätutkimuksissa ole havaittu vaikutuksia näin matalilla tasoilla.

Myös lyijyn vaikutuksia kardiovaskulaarisiin sairauksiin ja niiden aiheuttamiin kuolemiin on tutkittu työntekijöillä (ECHA 2020a). Tulokset ovat olleet vaihtelevia, ja suurimmassa osassa tutkimuksia ei ole otettu huomioon sekoittavia tekijöitä kuten tupakointia (ECHA 2020a). Laajin tutkimus on Steenland et al. (2017), johon on yhdistetty terveystutkimuksia USA:sta, Suomesta ja Isosta-Britanniasta. Aineiston kokonaistyöntekijämäärä oli yli 80 000 henkilöä ja kuolemia oli tutkimuksen kattamalla aikavälillä yli 14 000. Riski kuolla iskeemisiin sydänsairauksiin (vaarasuhde (HR) 1,41;

95 % luottamusväli (CI) 1,28-1,57) ja aivohalvaukseen (HR=1,41; 95 % CI 1,16-1,72) oli korkeampi veren lyijypitoisuuden ollessa yli 400 µg/l verrattuna työntekijöihin, joiden veren lyijypitoisuus oli alle 200 µg/l. Verrattuna kansallisiin (koko väestön) kuolleisuuslukuihin eroa ei kuitenkaan havaittu.

Hematologiset vaikutukset

Lyijy inhiboi hemisynteesiä (ECHA 2020a). Hemisynteesin entsyymeiden (mm. ALAD) toiminnassa havaitaan muutoksia jo veren lyijypitoisuuksilla alle 100 µg/l, mutta näiden muutosten kliinisestä merkityksestä ei ole varmuutta. Hemisynteesin heikkenemistä on havaittu veren lyijypitoisuuksilla noin 550 µg/l. Karita et al. (2005) määritteli hemoglobiini-vaikutuksille BMDL₅-tason 195 µg/l (veren lyijypitoisuus, jossa haittavaikutuksen esiintyvyys on 95 % todennäköisyydellä alle 5 %).

Genotoksisuus ja karsinogeenisuus

Lyijyn on osoitettu aiheuttaneen työperäisesti altistuvilla DNA-vaurioita, klastogeenisyyttä, kromosomipoikkeavuuksia, heikentyntä DNA-vaurioiden korjausta, sisarkromatidivaihdoksia ja DNA-proteiini-ristisidoksia veren lyijypitoisuuksilla ≥ 300 µg/l (ECHA 2020a). Mutageenisuuskokeet *in vitro* ovat olleet pääosin negatiivisia (ASTDR 2020; ECHA 2020). Lyijyn ajatellaankin olevan epäsuorasti genotoksinen reaktiivisten happiradikaalien ja heikentyneen DNA-korjausmekanismin kautta.

On joitakin työntekijätutkimuksia, joissa genotoksisia vaikutuksia on havaittu jo 200 µg/l veren lyijypitoisuuksilla. Nämä tutkimukset ovat kuitenkin olleet pieniä ja sisältäneet myös selvästi korkeamman veren lyijypitoisuuden näytteitä ja potentiaalisia sekoittavia tekijöitä, joita ei ole kattavasti huomioitu (ECHA 2020a).

Suomalaisessa rekisteritutkimuksessa (n=20729) havaittiin annos-vasteisesti kohonnut keuhkosityöpäriski veren lyijypitoisuuksilla 1,0–1,9 µmol/l (270–393 µg/l) (riskisuhde (RR) 1,72; 95% CI 1,28–2,31) ja $\geq 2,0$ µmol/l (≥ 414 µg/l) (RR 2,63; 95% CI 1,71–4,05), verrattuna työntekijöihin, joiden veren lyijypitoisuus oli alle 0,5 µmol/l (104 µg/l) (Anttila et al. 2022). Tässä tutkimuksessa huomioitiin ikä, tupakoinnin vaikutus, sosio-ekonominen tilanne sekä altistuminen muille työperäisille karsinogeneille. Myös osassa aikaisempia tutkimuksia on saatu viitteitä lievästi kohonneesta keuhkosityöpäriskistä lyijylle työperäisesti altistuneilla (IARC 2006; ECHA 2020a).

Ranskalaisessa lyijy- ja sinkkisulattamossa tehdyssä 48 vuoden seurantatutkimuksessa (n=2226) syöpäkuolleisuutta verrattiin paikallisiin kuolleisuuslukuihin (Leroyer et al. 2022). Riski kuolla huuli-suuontelo-nielusyöpiin oli

lievästi kohonnut (HR: 2,86 (95 % CI: 0,69–11,96) työntekijöillä, joiden kumulatiivinen lyijyaltistuminen oli 500–2000 µg/m³-vuotta. Kuitenkaan kohonnutta riskiä ei ollut havaittavissa tätä korkeammalla kumulatiivisella lyijyaltistumisella (>2000 µg/m³-vuotta). Myös riski kuolla maksasyöpiin oli kohonnut (500–2000 µg/m³-vuotta: HR: 3,26 (95 % CI: 0,25–41,72); >2000 µg/m³-vuotta: HR: 13,36 (95 % CI: 1,30–137,2)). Sekoittavia tekijöitä, ikää lukuun ottamatta, ei otettu tutkimuksessa huomioon.

Vanhempien epidemiologisten tutkimusten tulokset työperäisen lyijyaltistumisen ja syövän (mm. aivo- ja munuaiskasvaimet) yhteydestä ovat olleet epä johdonmukaisia, ja sekoittavia tekijöitä on otettu tutkimuksissa heikosti huomioon (ECHA 2020a).

Lisääntymisterveysvaikutukset

Lyijyn on todettu heikentävän siemennesteen laatua veren lyijypitoisuuksilla noin 400 µg/l (Bonde et al. 2002; ECHA 2020a; Kasperczyk et al. 2008). Lisäksi miesten työperäisellä lyijyaltistumisella on havaittu yhteys puolison lisääntyneeseen riskiin keskenmenoille, kohtukuolemille ja lapsen alentuneelle syntymäpainolle (ECHA 2020a).

Italialaisen keramiikkalaattatehtaan työntekijöitä koskeneessa tutkimuksessa naispuolisten työntekijöiden veren lyijypitoisuuden havaittiin olevan yhteydessä kasvaneeseen keskenmenoriskiin, pitkittyneeseen raskausajan kestoon, korkeaan verenpaineeseen, pre-eklampsiaan sekä lapsiveden ongelmiin (Paredes Alpaca et al. 2013). Pitkittynyt raskauden kesto havaittiin veren lyijypitoisuuksilla >50 µg/l ja muut vaikutukset pitoisuuksilla >150 µg/l.

Äidin työperäinen lyijyaltistuminen voi vaikuttaa lapsen hermoston kehittymiseen raskauden aikana tai myöhemmin lapsuudessa, kun raskauden aikana lapsen luustoon kertynyt lyijy vapautuu verenkiertoon (ECHA 2020a). Lapset ovat erityisen herkkiä lyijyn neurologisille vaikutuksille, eikä lapsille ole tunnistettu annosrajaa, jonka alapuolella haittavaikutuksia ei esiintyisi (Lanphear et al. 2005).

Eläinkokeiden havainnot

Akuutit vaikutukset

Epäorgaanisen lyijyn LD50-arvot suun kautta ovat yli 2000 mg/kg painokiloa kohti (ECHA 2020a). Lyhytaikaisen (n. 14 vrk) altistuksen jälkeen tappava annos on ollut lyijyasetaatilla, lyijynitratilla, lyijyoleaatilla, lyijysulfaatilla ja lyijyoksidilla 300–4000 mg/kg painokiloa kohti (ECHA 2020a).

Toistuvan altistumisen vaikutukset

Subkroonisissa tutkimuksissa rotilla, kissoilla ja apinoilla lyijyn on havaittu aiheuttavan aistihermoston ja motoriikan sekä keskittymisen heikentymistä ja käytöksen muuttumista (ECHA 2020a). Apinoilla vaikutukset ovat olleet havaittavissa veren lyijypitoisuuksilla 100–150 µg/l ja rotilla jonkin verran tätä korkeammilla pitoisuuksilla (ECHA 2020a). Korkeammilla pitoisuuksilla on todettu myös kuulon ja näön heikentymistä (ECHA 2020a). Oppimisvaikeuksia on todettu apinoilla ja rotilla raskaudenaikaisen ja syntymän jälkeisen altistuksen jälkeen veren lyijypitoisuuksilla 100–150 µg/l (ECHA 2020a).

Pitkäaikaisissa tutkimuksissa lyijyn on osoitettu aiheuttavan muutoksia munuaistiehyiden solujen toiminnassa kaneilla, apinoilla ja koirilla (ECHA 2020a). Rotilla lyijy nosti aluksi munuaiskeräsen suodatusnopeutta (GFR) pitoisuuksilla 294–1254 µg/l, myöhemmin vaikutus palautui, ja korkeammilla pitoisuuksilla GFR jopa laski kontrolleihin verrattuna (ECHA 2020a). Myös histopatologisia muutoksia munuaisissa on todettu.

Lyijyn sydän- ja verisuonivaikutukset rotilla ovat olleet vaihtelevia subkroonisissa ja pitkäaikaisissa kokeissa (ECHA 2020a). Osassa kokeissa on havaittu rytmihäiriöitä ja systolisen verenpaineen nousua. Veren punasolujen toiminnan heikentymistä ja eliniän lyhenemistä on todettu rotilla veren lyijypitoisuuksilla 17–71 µg/l (ECHA 2020a).

Karsinogeenisuus

Lyijyn on todettu olevan karsinogeeninen jysijöillä, aiheuttaen kasvaimia useisiin elimiin, kuten aivoihin, munuaisiin ja keuhkoihin (ECHA 2020a). Erityisesti lyijyn munuaissyöpää aiheuttava vaikutus on todettu useissa tutkimuksissa. Matalin lyijyasettaattipitoisuus, jolla munuaissyöpiä on havaittu kahden vuoden karsinogeenisuustutkimuksissa rotilla, oli 10 mg/kg painokiloa kohti/vrk juomavedessä annettuna. Munuaissyöpiä ei havaittu annostasolla 2 mg/kg painokiloa kohti/vrk (ECHA 2020a). Hiirillä munuaissyöpiä todettiin annostasolla 100 mg/kg painokiloa kohti/vrk juomavedessä.

Lisääntymistoksisuus

Lyijyn on todettu vaikuttavan siemennesteen laatuun, lisääntymiselinten rakenteeseen ja yleisesti heikentyneeseen lisääntymiskykyyn useiden eri eläinlajien uroksilla (ECHA 2020a). Haittoja on havaittu apinoilla veren lyijypitoisuuksilla 320–360 µg/l, kaneilla pitoisuuksilla 160–240 µg/l ja rotilla pitoisuuksilla 340–380 µg/l. Naarailta lyijyn vaikutuksia lisääntymiseen on tutkittu rajallisesti.

Nampoothiri ja Gutpa (2008) annostelivat lyijyasetaattia ihon alle 0,5 mg/kg painokiloa kohti/vrk naarasrotille viisi päivää ennen paritusta, parituksen aikana ja tiineyden ajan. Veren lyijypitoisuus oli 2490 µg/l. Muutoksia havaittiin steroidogeenisten hormonien pitoisuuksissa istukassa ja munasarjoissa, mutta ei painon nousussa, pentueen koossa, kuolleiden sikiöiden määrässä tai munasarjojen tai istukan painossa.

Varnagy et al. (2002) tekemässä yhden sukupolven lisääntymistoksisuustutkimuksessa (OECD TG 415) naaras- ja uroshiirillä ja niiden jälkeläisillään havaittiin painon laskua, mutta ei muita vaikutuksia annostasoilla 1000 ja 5000 mg/kg ruuassa. Hilderbrand et al. (1973) tutkimuksessa rotilla havaittiin häiriintynyt kuukautiskierto veren lyijypitoisuudella 190 µg/l ja morfologisia muutoksia munasoluissa pitoisuudella 300 µg/l. Lyijyn on havaittu viivästyttävän naarashiirten murrosikää veren lyijypitoisuuksilla 13–130 µg/l (ECHA 2020a).

Lyijyn ja sen yhdisteiden riskinarvioiteja

Kansainvälinen syöväntutkimusjärjestö (IARC) on luokitellut lyijyn luokan 2A karsinogeeniksi eli todennäköisesti ihmiselle syöpävaaralliseksi (IARC 2006). IARC piti epidemiologisista tuntemuksista saatuja tietoja lyijyn karsinogeenisuudesta rajoittuneina, mutta eläinkokeista saatuja tietoja riittävinä. Eläinkokeissa lyijy-yhdisteiden on todettu aiheuttavan erityisesti munuaiskasvaimia.

EU:n kemikaaliviraston riskinarviointikomitean (RAC) vuonna 2020 esittämä veren lyijypitoisuuden raja-arvo 150 µg/l perustui lyijyn neurologisiin vaikutuksiin, joiden osalta tutkimuksissa on osoitettu korkeimmaksi haittaa aiheuttamattomaksi veren lyijypitoisuudeksi työssään lyijylle altistuneilla 180 µg/l (ECHA 2020b). RAC arvioi, ettei lyijy aiheuta ehdotetulla raja-arvotasolla 150 µg/l neurotoksisia vaikutuksia aikuisissa. Erillistä turvakerrointa ei arvioitu tarvittavan, koska raja-arvo perustuu humanidataan ja tutkimuksia lyijyn hermostovaikutuksia on runsaasti, joten myös yksilöiden välinen vaihtelu tulee huomioitua. Raja-arvotason arvioitiin suojaavan myös klastogeenisilta vaikutuksilta, joita on havaittu veren lyijypitoisuuksilla ≥ 300 µg/l, ja siten myös mahdolliselta syöpäriskiltä. RAC totesi, ettei lyijyn kehitysneurotoksisille vaikutuksille pystytä määrittämään turvallista altistumistasoa.

RAC esitti lyijyn ilmapitoisuuden raja-arvoksi 0,004 mg Pb/m³ (hengittyvä jae, 8 h keskipitoisuus). Ilmapitoisuuden raja-arvo johdettiin veren lyijypitoisuuden ohjeraja-arvosta 150 µg/l, hyödyntäen Kalifornian ympäristöviranomaisen kehittämää farmakokineettistä mallia (OEHHA 2013).

RAC ei esittänyt lyhytaikaista ilmapitoisuuden raja-arvoa lyijylle, koska lyijyllä tai sen epäorgaanisilla yhdisteillä ei katsottu olevan akuutteja haittavaikutuksia nykyisillä työperäiseen altistumisen liittyvillä pitoisuuksilla, vaan vaikutukset johtuvat pidempiaikaisesta altistumisesta.

Saksalainen raja-arvokomitea AGS esitti vuonna 2017 lyijyn biologiseksi raja-arvoksi 150 µg/l (AGS 2017). AGS määrittäi matalimmaksi haittaa aiheuttavaksi veren lyijypitoisuudeksi 300 µg/l perustuen hermostovaikutuksiin, josta turvakerrointa kaksi käyttämällä johdettiin biologinen raja-arvo 150 µg/l. AGS ei asettanut ilmapitoisuuden raja-arvoa lyijylle, koska raja-arvon määrittämistä ei katsottu mahdolliseksi tehdä tieteellisesti riittävän laadukkaasti. Vuonna 2021 Saksalainen MAK-komitea kuitenkin esitti lyijyn ilmapitoisuuden ohjeraja-arvoksi 0,004 mg Pb/m³ (hengittyvä jae, 8 h keskipitoisuus) (DGF 2021). Ohjeraja-arvo vastasi ilmapitoisuuden tasoa, jolla veren lyijypitoisuus laskennallisesti alittaa biologisen raja-arvon 150 µg/l 95 %:lla altistuneista työntekijöistä. Ohjeraja-arvon määrittämisessä hyödynnettiin samaa Kalifornian ympäristöviranomaisen kehittämää farmakokineettistä mallia, jota myös RAC käytti omassa arviossaan.

Ranskalainen asiantuntijakomitea ANSES (2017) esitti biologiseksi raja-arvoksi 180 µg/l pohjautuen Schwartz et al. (2001, 2005) korealaisilla työntekijöillä tekemiin tutkimuksiin. Näiden tutkimusten pohjalta ANSES määrittäi matalimmaksi haittaa aiheuttavaksi tasoksi 210 µg/l ja haittaa aiheuttamattomaksi tasoksi 180 µg/l. ANSES totesi, että synnytysikäisillä naisilla ei suositella lyijyn veren lyijypitoisuuden ylittävän taustapitoisuutta, koska lisääntymisterveysvaikutusten osalta ei pystytä määrittämään turvallista annostasoa.

ANSES totesi biomonitoroinnin parhaaksi käytännöksi lyijyaltistumisen seurantaan, mutta määrittäi myös ilmapitoisuuden raja-arvon 0,03 mg Pb/m³ (hengittyvä jae, 8 h painotettu keskipitoisuus) perustuen Safe Work Australian (2014) määrittämiin ilman ja veren lyijypitoisuuden korrelaatioihin. Safe Work Australia käytti laskelmissaan kuutta eri tutkimusta, mutta ANSES käytti näistä vain kahta, jotka vastasivat parhaiten Ranskan tilannetta. Safe Work Australian tarkastelussa ilmapitoisuuden vaikutus veren lyijypitoisuuteen oli suurempi matalammilla ilman lyijypitoisuuksilla kuin korkeammilla. Korrelaatiota ei voitu luotettavasti määrittää matalammille ilmapitoisuuksille kuin 0,05 mg Pb/m³, koska mittaustietoa tätä matalammista pitoisuuksista ei ollut. Siksi matalammilla ilman lyijypitoisuuksilla korrelaatioon liittyy suurempia epävarmuuksia.

Sitova raja-arvo

Altistuminen lyijylle ja sen epäorgaanisille yhdisteille on epidemiologisissa tutkimuksissa ja eläinkokeissa liitetty erityisesti vaikutuksiin hermostoon, munuaisiin, sydän- ja verenkiertoelimistöön sekä lisääntymisterveyteen. Lyijyn ihmisellä todettuja hermostomyrkyllisiä vaikutuksia ovat ääreishermoston johtumisen hidastuminen sekä vaikutukset oppimiseen, muistiin, psykomotorisiin taitoihin, keskittymiseen ja näköaistin vastaanottaman tiedon käsittelyyn. Lisäksi lyijyn ja sen epäorgaanisten yhdisteiden on osoitettu aiheuttavan munuaissyöpää ja aivokasvaimia eläimillä.

Työperäiseen altistumiseen liittyvien terveysvaikutusten vähentämiseksi lyijylle ja sen epäorgaanisille yhdisteille on asetettu sitova raja-arvo $0,03 \text{ mg Pb/m}^3$ (hengittyvä jae, 8 h vertailuaika) (Vna 161/2026). Raja-arvo perustuu työntekijöiden suojelemisesta syöpäsairauden vaaraa aiheuttavilta ja lisääntymiselle vaarallisilta tekijöiltä työssä annettuun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviin 2004/37/EY, jota on päivitetty lyijyn ja sen epäorgaanisten yhdisteiden raja-arvojen osalta direktiivillä (EU) 2024/869.

Lyijyaltistuminen lisää riskiä melun aiheuttamaan kuuluvaurioon, ja lyijylle ja sen epäorgaanisille yhdisteille on siksi annettu huomautus ”melu”. Koska lyijyn kehitysneurotoksisten vaikutusten osalta ei pystytä määrittämään turvallista altistumistasoa, on lyijylle ja sen epäorgaanisille yhdisteille annettu huomautus ”kynnysarvoton lisääntymiselle vaarallinen aine”.

Lyijyaltistumiseen liittyvää terveysriskiä ei voida luotettavasti arvioida ilmapitoisuusmittausten perusteella. Altistumisen ja altistumiseen liittyvän terveysriskin arvioimiseksi työntekijöille tulee tehdä veren lyijypitoisuuden mittauksia.

Biologisten näytteiden sitova raja-arvo

Lyijyn kriittisimpänä vaikutuksena voidaan pitää hermostovaikutuksia. Hermostovaikutusten osalta korkeimmaksi haittaa aiheuttamattomaksi veren lyijypitoisuudeksi työssään altistuneilla on todettu $180 \text{ } \mu\text{g/l}$. Lyijyn muut terveysvaikutukset ovat nähtävissä tätä korkeammilla veren lyijypitoisuuksilla. Veren lyijypitoisuuden $150 \text{ } \mu\text{g/l}$ katsotaan suojaavan neurotoksisuuden lisäksi myös klastogeenisilta vaikutuksilta ja siten mahdolliselta syöpäriskin kasvulta. Lyijyn kehitysneurotoksisille vaikutuksille ei kuitenkaan pystytä määrittämään turvallisen altistumisen tasoa.

Työperäiseen altistumiseen liittyvien terveysvaikutusten vähentämiseksi lyijylle ja sen epäorgaanisille yhdisteille on asetettu biologisten näytteiden sitova raja-arvo $150 \text{ } \mu\text{g/l}$ veren lyijynä mitattuna (Vna 161/2026). Raja-arvo on voimassa 1.1.2029 alkaen ja perustuu työntekijöiden suojelemisesta syöpäsairauden vaaraa aiheuttavilta ja

lisääntymiselle vaarallisilta tekijöiltä työssä annettuun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviin 2004/37/EY, jota on päivitetty lyijyn ja sen epäorgaanisten yhdisteiden raja-arvojen osalta direktiivillä (EU) 2024/869..

Jos työntekijöiden veren lyijypitoisuus on alle 300 µg Pb/l verta, mutta ylittää biologisen raja-arvon 150 µg Pb/l verta sellaisen altistumisen vuoksi, joka tapahtui ennen 9.4.2026, ja näillä työntekijöillä havaitaan laskeva suuntaus kohti raja-arvoa 150 µg Pb/l, he voivat jatkaa työskentelyä tehtävissä, joihin liittyy altistumista lyijylle.

Siirtymäajalla 9.4.2026–31.12.2028 biologisten näytteiden sitova raja-arvo on 300 µg Pb/l veren lyijynä mitattuna. Jos työntekijöiden veren lyijypitoisuus siirtymäajalla on alle 500 µg Pb/l verta, mutta ylittää biologisen raja-arvon 300 µg Pb/l verta sellaisen altistumisen vuoksi, joka tapahtui ennen 9.4.2026, ja näillä työntekijöillä havaitaan laskeva suuntaus kohti raja-arvoa 300 µg Pb/l, he voivat jatkaa työskentelyä tehtävissä, joihin liittyy altistumista lyijylle.

Verinäyte voidaan ottaa mihin vuorokaudenaikaan tahansa. Näyte on kontaminaatioherkkä.

Eri asettajien ilman epäpuhtauksien raja-arvojen vertailu

Eri maiden voimassa olevia työilman pitoisuuden raja-arvoja lyijylle ja sen epäorgaanisille yhdisteille. EU-maat listattu vain, jos niiden raja-arvo poikkeaa EU:n sitovasta raja-arvosta 0,03 mg Pb/m³ (hengittyvä jae).

Asettaja	Vuosi*	Vertailuaika				Huom.
		8 h		15 min		
		ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	
Suomi (sitova raja-arvo)	1993	-	0,1	-	-	Pb, melu
EU (BOELV)	2024	-	0,03	-	-	Pb, kynnysarvoton lisääntymiselle vaarallinen aine
Saksa (DFG)	2021	-	0,004	-	0,032	Pb
Latvia		-	0,005	-	0,01	Pb
Iso-Britannia	2002	-	0,15	-	-	Pb
USA (ACGIH)	1995	-	0,05	-	-	Pb
USA (OSHA)		-	0,05	-	-	Pb
Kanada		-	0,05	-	-	Pb
Suomi, sitova raja-arvo	2026	-	0,03	-	-	Pb, melu, kynnysarvoton lisääntymiselle vaarallinen aine

(ACGIH 2024, IFA 2024)

* Raja-arvon asettamisvuosi (jos tiedossa).

Viitteet

ACGIH 2024. Lead and inorganic compounds. ACGIH, Cincinnati, OH.

<https://www.acgih.org/lead-and-inorganic-compounds-3/>

AGS 2017. Blei und anorganische Bleiverbindungen (CAS.Nr.: 7439-92-1). Ausschuss für Gefahrstoffe, BAuA, Germany.

Aktürk, T., Çeliker, G., Saçmacı, H., 2022. Impact of occupational lead exposure on nerve conduction study data. *Int J Neurosci* 132, 306-312.

<https://doi.org/10.1080/00207454.2021.1873784>

ANSES 2017a. COLLECTIVE EXPERT APPRAISAL: SUMMARY AND CONCLUSIONS

Regarding the “expert appraisal on recommending occupational exposure limits for chemical agents” On the assessment of health effects and methods for the measurement of exposure levels in workplace atmospheres for lead and its inorganic compounds. French agency for food, environmental and occupational health & safety.

ANSES 2017b. COLLECTIVE EXPERT APPRAISAL: SUMMARY AND CONCLUSIONS

Regarding the “expert appraisal for recommending occupational exposure limits for chemical agents” on the evaluation of biomarkers and recommendations of biological limit values and biological reference values for inorganic lead and its compounds. French agency for food, environmental and occupational health & safety.

Anttila, A., Uuksulainen, S., Rantanen, M., Sallmén, M., 2022. Lung cancer incidence among workers biologically monitored for occupational exposure to lead: a cohort study. *Scand J Work Environ Health* 48, 540-548. <https://doi.org/10.5271/sjweh.4046>

Bonde, J.P., Joffe, M., Apostoli, P., Dale, A., Kiss, P., Spano, M., Caruso, F., Giwercman, A., Bisanti, L., Porru, S., Vanhoorne, M., Comhaire, F., Zschiesche, W., 2002. Sperm count and chromatin structure in men exposed to inorganic lead: lowest adverse effect levels. *Occup Environ Med* 59, 234-242. <https://doi.org/10.1136/oem.59.4.234>

ATSDR, Toxicological profile for Lead, 2020.

EC, 2023/923. COMMISSION REGULATION (EU) 2023/923 Official Journal of the European Union.

ECHA, ANNEX 1 in support of the Committee for Risk Assessment (RAC) for evaluation of limit values for lead and its compounds at the workplace 2020a.

ECHA, Committee for Risk Assessment RAC Opinion on scientific evaluation of occupational exposure limits for Lead and its compounds 2020b.

Ekong, E.B., Jaar, B.G., Weaver, V.M., 2006. Lead-related nephrotoxicity: a review of the epidemiologic evidence. *Kidney Int* 70, 2074-2084. <https://doi.org/10.1038/sj.ki.5001809>

Gao, A., Lu, X.T., Li, Q.Y., Tian, L., 2010. Effect of the delta-aminolevulinic acid dehydratase gene polymorphism on renal and neurobehavioral function in workers exposed to lead in China. *Sci Total Environ* 408, 4052-4055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.024>

Gerofke, A., Ulbig, E., Martin, A., Müller-Graf, C., Selhorst, T., Gremse, C., Spolders, M., Schafft, H., Heinemeyer, G., Greiner, M., Lahrssen-Wiederholt, M., Hensel, A., 2018. Lead content in wild game shot with lead or non-lead ammunition - Does "state of the art consumer

health protection" require non-lead ammunition? PLoS One 13, e0200792.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200792>

Glenn, B.S., Bandeen-Roche, K., Lee, B.K., Weaver, V.M., Todd, A.C., Schwartz, B.S., 2006. Changes in systolic blood pressure associated with lead in blood and bone. *Epidemiology* 17, 538-544. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000231284.19078.4b>

Hernández-Serrato, M.I., Fortoul, T.I., Rojas-Martínez, R., Mendoza-Alvarado, L.R., Canales-Treviño, L., Bochichio-Riccardelli, T., Avila-Costa, M.R., Olaiz-Fernández, G., 2006. Lead blood concentrations and renal function evaluation: study in an exposed Mexican population. *Environ Res* 100, 227-231. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2005.03.004>

Hilderbrand, D.C., Der, R., Griffin, W.T., Fahim, M.S., 1973. Effect of lead acetate on reproduction. *Am J Obstet Gynecol* 115, 1058-1065. [https://doi.org/10.1016/0002-9378\(73\)90554-1](https://doi.org/10.1016/0002-9378(73)90554-1)

Hoet P, Jacquerye C, Deumer G, Lison D, Haufroid V. Reference values of trace elements in blood and/or plasma in adults living in Belgium. *Clin Chem Lab Med*. 2020 Oct 22;59(4):729-742. doi: 10.1515/cclm-2020-1019. PMID: 33085632.

Hsiao, C.Y., Wu, H.D., Lai, J.S., Kuo, H.W., 2001. A longitudinal study of the effects of long-term exposure to lead among lead battery factory workers in Taiwan (1989-1999). *Sci Total Environ* 279, 151-158. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(01\)00762-8](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(01)00762-8)

IARC, Inorganic and Organic Lead Compounds, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Inorganic-And-Organic-Lead-Compounds-2006>

IFA, 2024. GESTIS International Limit Values. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin.

Karimooy, H.N., Mood, M.B., Hosseini, M., Shadmanfar, S., 2010. Effects of occupational lead exposure on renal and nervous system of workers of traditional tile factories in Mashhad (northeast of Iran). *Toxicol Ind Health* 26, 633-638.
<https://doi.org/10.1177/0748233710377774>

Karita, K., Yano, E., Dakeishi, M., Iwata, T., Murata, K., 2005. Benchmark dose of lead inducing anemia at the workplace. *Risk Anal* 25, 957-962. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00652.x>

Kasperczyk, A., Kasperczyk, S., Horak, S., Ostalowska, A., Grucka-Mamczar, E., Romuk, E., Olejek, A., Birkner, E., 2008. Assessment of semen function and lipid peroxidation among lead exposed men. *Toxicol Appl Pharmacol* 228, 378-384.
<https://doi.org/10.1016/j.taap.2007.12.024>

Khan, D.A., Qayyum, S., Saleem, S., Khan, F.A., 2008. Lead-induced oxidative stress adversely affects health of the occupational workers. *Toxicol Ind Health* 24, 611-618.
<https://doi.org/10.1177/0748233708098127>

Krieg, E.F., Jr., Chrislip, D.W., Brightwell, W.S., 2008. A meta-analysis of studies investigating the effects of lead exposure on nerve conduction. *Arch Toxicol* 82, 531-542.
<https://doi.org/10.1007/s00204-008-0292-z>

Krieg, E.F., Jr., Chrislip, D.W., Crespo, C.J., Brightwell, W.S., Ehrenberg, R.L., Otto, D.A., 2005. The relationship between blood lead levels and neurobehavioral test performance in NHANES III and related occupational studies. *Public Health Rep* 120, 240-251.
<https://doi.org/10.1177/003335490512000305>

Lacerda D, Pestana IA, Santos Vergilio CD, de Rezende CE. Global decrease in blood lead concentrations due to the removal of leaded gasoline. *Chemosphere*. 2023 May;324:138207. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138207. Epub 2023 Feb 21. PMID: 36822521.

Lanphear, B.P., Hornung, R., Khoury, J., Yolton, K., Baghurst, P., Bellinger, D.C., Canfield, R.L., Dietrich, K.N., Bornschein, R., Greene, T., Rothenberg, S.J., Needleman, H.L., Schnaas, L., Wasserman, G., Graziano, J., Roberts, R., 2005. Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function: an international pooled analysis. *Environ Health Perspect* 113, 894-899. <https://doi.org/10.1289/ehp.7688>

Leroyer, A., Gomajee, H., Leroy, R., Mazzuca, M., Leleu, B., Nisse, C., 2022. Cancer mortality and chemical exposure in a retrospective zinc and lead smelter cohort: A 48-year follow-up. *Int J Hyg Environ Health* 242, 113955. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.113955>

Lin, T., Tai-Yi, J., 2007. Benchmark dose approach for renal dysfunction in workers exposed to lead. *Environ Toxicol* 22, 229-233. <https://doi.org/10.1002/tox.20260>

Meyer-Baron, M., Seeber, A., 2000. A meta-analysis for neurobehavioural results due to occupational lead exposure with blood lead concentrations <70 microg/100 ml. *Arch Toxicol* 73, 510-518. <https://doi.org/10.1007/s002040050002>

Murata, K., Iwata, T., Dakeishi, M., Karita, K., 2009. Lead toxicity: does the critical level of lead resulting in adverse effects differ between adults and children? *J Occup Health* 51, 1-12. <https://doi.org/10.1539/joh.k8003>

Nampoothiri, L.P., Gupta, S., 2008. Biochemical effects of gestational coexposure to lead and cadmium on reproductive performance, placenta, and ovary. *J Biochem Mol Toxicol* 22, 337-344. <https://doi.org/10.1002/jbt.20246>

Nawrot, T.S., Thijs, L., Den Hond, E.M., Roels, H.A., Staessen, J.A., 2002. An epidemiological re-appraisal of the association between blood pressure and blood lead: a meta-analysis. *J Hum Hypertens* 16, 123-131. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1001300>

Nisse C, Tagne-Fotso R, Howsam M; Members of Health Examination Centres of the Nord – Pas-de-Calais region network; Richeval C, Labat L, Leroyer A. Blood and urinary levels of metals and metalloids in the general adult population of Northern France: The IMEPOGE study, 2008-2010. *Int J Hyg Environ Health*. 2017 Apr;220(2 Pt B):341-363. doi: <https://10.1016/j.ijheh.2016.09.020>

OEHHA, O.o.E.H.H.A.O.C.E.P.A., Estimating Workplace Air and Worker Blood Lead Concentration using an Updated Physiologically-based Pharmacokinetic (PBPK) Model 2013.

Onuegbu, A.J., Olisekodiaka, M.J., Nwaba, E.I., Adeyeye, A.D., Akinola, F.F., 2011. Assessment of some renal indices in people occupationally exposed to lead. *Toxicol Ind Health* 27, 475-479. <https://doi.org/10.1177/0748233710390020>

Orisakwe, O.E., Nwachukwu, E., Osadolor, H.B., Afonne, O.J., Okocha, C.E., 2007. Liver and kidney function tests amongst paint factory workers in Nkpor, Nigeria. *Toxicol Ind Health* 23, 161-165. <https://doi.org/10.1177/0748233707081908>

Paredes Alpaca, R.I., Forastiere, F., Pirani, M., 2013. [Low exposure to lead and reproductive health: a cohort study of female workers in the ceramic industry of Emilia-Romagna (Northern Italy)]. *Epidemiol Prev* 37, 367-375.

Porrás, S.P., Tuovila, J., Santonen, T., 2025. Non-occupational exposure to trace elements in Finland – Urinary and blood biomonitoring study. *Environmental Advances* 20, 100642.

SAFE WORK AUSTRALIA 2014. Review of hazards and health effects of inorganic lead – implications for WHS regulatory policy. In: AUSTRALIA, C. S. W. (ed.)

Schutz, A., Skerfving, S., Ranstam, J., Christoffersson, J.O., 1987. Kinetics of lead in blood after the end of occupational exposure. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 221-231. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2059>

Schwartz, B.S., Lee, B.K., Bandeen-Roche, K., Stewart, W., Bolla, K., Links, J., Weaver, V., Todd, A., 2005. Occupational lead exposure and longitudinal decline in neurobehavioral test scores. *Epidemiology* 16, 106-113. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000147109.62324.51>

Schwartz, B.S., Lee, B.K., Lee, G.S., Stewart, W.F., Lee, S.S., Hwang, K.Y., Ahn, K.D., Kim, Y.B., Bolla, K.I., Simon, D., Parsons, P.J., Todd, A.C., 2001. Associations of blood lead, dimercaptosuccinic acid-chelatable lead, and tibia lead with neurobehavioral test scores in South Korean lead workers. *Am J Epidemiol* 153, 453-464. <https://doi.org/10.1093/aje/153.5.453>

Seeber, A., Kiesswetter, E., Neidhart, B., Blaszkewicz, M., 1990. Neurobehavioral effects of a long-term exposure to tetraalkyllead. *Neurotoxicol Teratol* 12, 653-655. [https://doi.org/10.1016/0892-0362\(90\)90080-v](https://doi.org/10.1016/0892-0362(90)90080-v)

Seeber, A., Meyer-Baron, M., Schäper, M., 2002. A summary of two meta-analyses on neurobehavioural effects due to occupational lead exposure. *Arch Toxicol* 76, 137-145. <https://doi.org/10.1007/s00204-001-0315-5>

Steenland, K., Barry, V., Anttila, A., Sallmén, M., McElvenny, D., Todd, A.C., Straif, K., 2017. A cohort mortality study of lead-exposed workers in the USA, Finland and the UK. *Occup Environ Med* 74, 785-791. <https://doi.org/10.1136/oemed-2017-104311>

TTL, 2023a. Työhygieenisten mittausten rekisteri. Työterveyslaitos, Helsinki. (julkaisematon).

TTL, 2023b. Biologisten altistumismittausten rekisteri. Työterveyslaitos, Helsinki. (julkaisematon).

Tsoi, M.F., Lo, C.W.H., Cheung, T.T., Cheung, B.M.Y., 2021. Blood lead level and risk of hypertension in the United States National Health and Nutrition Examination Survey 1999–2016. *Scientific Reports* 11, 3010. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82435-6>

Várnagy, L., Budai, P., Molnár, E., Takács, I., Fejes, S., Albert, M., Dobos-Kovács, M., 2002. One-generation reproduction toxicity study of Dithane M-45 (mancozeb) and lead acetate. *Acta Vet Hung* 50, 365-371. <https://doi.org/10.1556/AVet.50.2002.3.12>

Weaver, V.M., Griswold, M., Todd, A.C., Jaar, B.G., Ahn, K.D., Thompson, C.B., Lee, B.K., 2009. Longitudinal associations between lead dose and renal function in lead workers. *Environ Res* 109, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.09.005>

Yu, C.G., Wei, F.F., Yang, W.Y., Zhang, Z.Y., Mujaj, B., Thijs, L., Feng, Y.M., Staessen, J.A., 2019. Heart rate variability and peripheral nerve conduction velocity in relation to blood lead in newly hired lead workers. *Occup Environ Med* 76, 382-388. <https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105379>

Yu, Y.L., Yang, W.Y., Hara, A., Asayama, K., Roels, H.A., Nawrot, T.S., Staessen, J.A., 2022. Public and occupational health risks related to lead exposure updated according to present-day blood lead levels. *Hypertens Res*. <https://doi.org/10.1038/s41440-022-01069-x>