

Altistuminen ja terveysriskit metallien 3D-tulostustöissä

LOPPURAPORTTI TSR-HANKKEISTA 230103 JA 230119

Maija Leppänen
Antti Karjalainen
Kukka Aimonen
Antti Väisänen
Marko Hyttinen
Tiina Santonen

Altistuminen ja terveysriskit metallien 3D-tulostustöissä

LOPPURAPORTTI TSR-HANKKEISTA 230103 JA 230119

Maija Leppänen

Antti Karjalainen

Kukka Aimonen

Antti Väisänen

Marko Hyttinen

Tiina Santonen

Työterveyslaitos

PL 40

00251 Helsinki

www.ttl.fi

© 2025 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston tuella.

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

ISBN 978-952-391-204-5 (PDF)

Tiivistelmä

Altistuminen ja terveysriskit metallien 3D-tulostustöissä -tutkimushankkeessa selvitettiin metallien 3D-tulostuksen eri työvaiheiden aikaista hiukkas- ja metallialtistumista sekä arvioitiin tulostustöiden aiheuttamaa terveysriskiä mittauksin, näytteenotoin ja kyselyin. Tutkimuskohteina oli 13 työpaikkaa, joissa tehdään metallien 3D-tulostusta. Tutkimukseen osallistui yhteensä 32 työntekijää 3D-tulostustyöpaikoilta, joista 18 oli operaattoreita ja 14 muita työntekijöitä, sekä 15 verrokkia työpaikoilta, joissa ei altistuta metalleille.

Altistumisen kannalta merkittävimmät työvaiheet metallien 3D-tulostuksessa olivat valmiiden kappaleiden jälkikäsittely ja tulostusjauheiden käsittely. Näiden työvaiheiden aikana mitattiin kohonneita hiukkasten lukumääräpitoisuuksia, kun taas itse tulostuksen aikaiset hiukkaspitoisuudet olivat pääsääntöisesti matalia. Kolmasosalla operaattoreista keskimääräinen työpäivän aikainen hiukkasten lukumääräpitoisuus ylitti teollisille nanohiukkasille ehdotetun tavoitetason.

Hengittävän pölyn pitoisuudet olivat pääasiassa alhaisia ja alittivat epäorgaanisen pölyn HTP_{8h}-arvon (10 mg/m³) operaattoreiden hengitysvyöhykkeillä ja kiinteissä mittauspisteissä. Pitoisuudet alittivat myös hengittävälle pölylle ehdotetun tavoitetason (2 mg/m³) kolmea operaattoria lukuun ottamatta.

Metallien ilmapitoisuudet olivat pääsääntöisesti matalia ja HTP-arvojen ylityksiä havaittiin vain yksittäisissä näytteissä. Korkeimmat pitoisuudet operaattoreiden hengitysvyöhykkeeltä mitattiin alumiinille, koboltille, kuparille ja nikkelille. Käsienvyöhykän näytteissä metallien keskimääräiset pitoisuudet olivat selkeästi korkeammat työvuoron tai altistavan työvaiheen jälkeen verrattuna ennen työpäivää otettuihin näytteisiin. Käsienvyöhykän näytteissä korkeimmat työpäivän jälkeiset pitoisuudet olivat raudalla ja alumiinilla.

Biomonitorointitulosten perusteella työntekijöillä ei havaittu merkittävästi korkeampia virtsan metallipitoisuuksia kuin tutkimuksen verrokkiryhmällä. Työvuoron jälkeen kerätyissä virtsanäytteissä ei havaittu korkeampia metallipitoisuuksia verrattuna ennen työviikkoa kerättyihin näytteisiin. Altistumattomien viiteraja-arvon ylityksiä havaittiin seitsemän metallin kohdalla (molybdeeni, kromi, koboltti, mangaani, lyijy, vanadiini ja tina), mutta terveysperusteiset biomonitoroinnin toimenpideraja-arvot eivät ylittyneet minkään tutkitun metallin osalta. Hengitysilma-kondensaattien metallipitoisuudet olivat matalia, eikä työvuoron jälkeen kerätyissä näytteissä pääsääntöisesti havaittu korkeampia metallipitoisuuksia verrattuna ennen työvuoroa kerättyihin näytteisiin.

Tutkimuksessa ei havaittu merkkejä työperäiseen altistumiseen liittyvästä keuhkojen tulehdusreaktiosta. Operaattorit kokivat kyselyn perusteella enemmän ylähengitystie-, silmä- ja iho-oireita, kuin muut työntekijät tai verrokit. Sekoittavien tekijöiden (esim. tupakka, allerginen nuha, aiempi astma) vaikutusta koettuihin oireisiin ei voi kuitenkaan poissulkea. Tutkimuksen tulosten perusteella terveysriskien voidaan katsoa jäävän kaiken kaikkiaan mataliksi tutkituissa työtehtävissä, kunhan hyvästä työhygieniasta ja suojautumisesta pidetään huolta.

Tutkimuksen havainnot ja mittaustulokset korostavat työhygienian merkitystä ja tarvetta soveltaa altistumisen hallintakeinoja metallien 3D-tulostukseen. Hankkeessa laadittiin malliratkaisu turvallisista työtavoista metallien 3D-tulostustöissä. Alan työpaikat voivat hyödyntää malliratkaisua toiminnassaan. Malliratkaisussa ohjeistetaan mm. altistumisen hallintaa, työtapoja ja -järjestelyitä sekä henkilönsuojainten valintaa.

Abstract

In the research project "Exposure and Health Risks in Metal 3D Printing Work," exposure to particles and metals during different stages of metal 3D printing was investigated, and the health risks associated with printing tasks were assessed through measurements, samplings, and surveys. The study involved 13 workplaces that apply metal 3D printing. A total of 32 participants from these workplaces participated in the study, including 18 operators and 14 other workers, as well as 15 controls from workplaces with no metal exposure.

The most significant exposure stages in metal 3D printing jobs were post-processing of printed products and the handling of printing powders. Elevated particle number concentrations were measured during these work phases, whereas particle concentrations during the actual printing process were generally low. For one third of the operators, the average particle number concentration during the workday exceeded the proposed target level for industrial nanoparticles.

The concentrations of inhalable dust were mostly low and remained below the Finnish occupational exposure limit (OEL_{8h}) for inorganic dust (10 mg/m³) in the operators' breathing zones and at stationary locations. The concentrations also remained below the proposed target level for inhalable dust (2 mg/m³), except for three operators.

Air concentrations of metals were generally low, and OEL values exceeded only in individual samples. The highest concentrations were measured in the operators' breathing zones for aluminum, cobalt, copper, and nickel. In hand wipe samples, the average metal concentrations were clearly higher after a work shift or a work phase with exposing tasks compared to samples taken before the workday. The highest metal concentrations in hand wipe samples after the workday were measured for iron and aluminum.

Based on biomonitoring results, workers did not have significantly higher urine metal concentrations compared to the control group. No higher metal concentrations were observed in urine samples collected after work shifts compared to those collected before the workweek. Exceedances of occupationally non-exposed Finnish population reference values were observed for seven metals (molybdenum, chromium, cobalt, manganese, lead, vanadium, and tin), but the health-based biomonitoring action threshold values were not exceeded for any of the studied metals. Metal concentrations in exhaled breath condensates were low, and no generally higher concentrations were observed in samples collected after work shifts compared to those collected before.

The study found no signs of a lung inflammation associated with occupational exposure. Operators reported more symptoms in upper respiratory tract, eye, and skin compared to other workers or controls. However, the influence of confounding factors (e.g., smoking, allergic rhinitis, prior asthma) on the reported symptoms cannot be ruled out. Overall, based on the results, health risks in the examined work tasks can be considered low, as long as good occupational hygiene practices and protective measures are maintained.

The findings and measurement results of the study emphasize the importance of occupational hygiene and the need to implement exposure control measures in metal 3D printing tasks. A control approach for safe metal 3D printing was developed as part of the project, and it can be applied in the metal 3D printing workplaces. The control approach provides guidance on exposure control, work practices and arrangements, and the selection of personal protective equipment.

Esipuhe ja kiitokset

Konsortiohanke ”Altistuminen ja terveysriskit metallien 3D-tulostustöissä” (META3D) toteutettiin 1.6.2023–30.5.2025 välisenä aikana. Hankkeen toteuttajina olivat Työterveyslaitos (TTL) ja Itä-Suomen yliopisto (UEF). Haluamme kiittää hankkeen päärahoittajaa, Työsuojelurahastoa, tutkimushankkeen mahdollistamisesta.

Hankkeessa oli mukana 13 kohdeorganisaatiota: kahdeksan yritystä ja viisi korkeakoulua, joissa tehdään, tutkitaan tai kehitetään metallien 3D-tulostusta: Aalto-korkeakoulusäätiö sr, Amexci Oy, Delva Oy, 3D Formtech Oy, DIMECC Oy:n hallinnoima tulostustila AM Campus, 3DStep Oy, Electro Optical Systems Finland Oy, Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto, Lillbacka Powerco Oy, Materflow Oy, Oulun yliopisto, Savonia-ammattikorkeakoulu Oy ja Turun yliopisto. Lämpimät kiitokset kohdeorganisaatioille mittausympäristöjen tarjoamisesta ja näiden henkilöstölle osallistumisesta mittauksiin. Kiitokset myös tutkimuksen ohjausryhmälle kommenteista hankkeen aikana.

Finnish Additive Manufacturing Ecosystem (FAME) auttoi hankkeen hakuvaiheessa kohdeorganisaatioiden tavoittamisessa ja itse tutkimuksen aikana hankkeen ja tulosten viestinnässä alan toimijoiden keskuudessa. Kiitokset FAME ja etenkin Eetu Holstein.

Kiitämme myös Talvikki Susiluomaa (TTL) avusta viestinnän koordinoinnissa ja etenkin malliratkaisun laatimisessa, Jenna Nordströmiä (TTL) käsienvyyrintänyytteiden analysoinnista, Huong Lytä ja Juha Tuovilaa (TTL) virtsa- ja EBC-näytteiden metallipitoisuuksien analysoinnista, Raija Vastapuuta ja Inga Pimenovia (TTL) avusta biomonitorointinäytteiden käsittelyssä, Hanna Koposta (UEF) ilmanäytteiden metallimäärityksistä, Jari Leskistä (UEF) elektronimikroskooppianalyyseistä sekä Suvi Niemistä (TTL) ja Leila Tiihosta (UEF) talousasioiden koordinoinnista.

Kuopiossa ja Helsingissä kesäkuussa 2025

Kirjoittajat

Sisällys

Tiivistelmä.....	3
Abstract	5
Esipuhe ja kiitokset	7
Sisällys.....	8
1 Johdanto	10
2 Tavoitteet.....	12
3 Aineisto ja menetelmät	13
3.1 Tutkimuskohteet.....	13
3.2 Mittaukset	14
3.2.1 Jauheanalytiikka	15
3.2.2 Työhygieeniset mittaukset	15
3.2.3 Biomonitorointi.....	17
3.3 Kyselyt.....	20
4 Tulokset ja niiden tarkastelu	21
4.1 Jauheanalytiikka.....	21
4.2 Altistuminen hiukkasille	24
4.2.1 Suodatinnäytteet.....	24
4.2.2 Jatkuvatoimiset mittalaitteet.....	25
4.3 Altistuminen metalleille	32
4.3.1 Ilmanäytteet	32
4.3.2 Käsienpyyhintänäytteet	34
4.3.3 Virtsanäytteet	36
4.3.4 Hengitysilmakondensaattinäytteet.....	41
4.4 Varhaiset tulehdusvaikutukset	42
4.5 Työntekijöiden kokemat oireet.....	43
5 Johtopäätökset ja tulosten hyödyntäminen	46
Lähteet	48

Liitteet	53
----------------	----

1 Johdanto

3D-tulostustekniikoiden käyttö ja alan henkilöstömäärät ovat lisääntyneet nopeasti niin Suomessa kuin maailmalla. Muovien 3D-tulostuksen lisäksi myös metallien 3D-tulostus on yleistynyt ja alan maailmanlaajuinen liikevaihto liikkuu nykyään miljardiluokassa (Piili ym., 2019, Vafadar ym., 2021, Hubs, 2022).

Metallien 3D-tulostuksessa on havaittu vapautuvan ilmaan ultrapieniä, hitsaushuuruja kaltaisia hiukkasia, jotka voivat kulkeutua syvälle hengitysteihin ja keuhkojen kautta myös verenkiertoon ja elimistöön (Graff ym., 2016, Ljunggren ym., 2019, Jensen ym., 2020, Azzougagh ym., 2021, Sousa ym., 2021, Dugheri ym., 2022, Oddone ym., 2022). Tulostuslaitteiden käyttäjät altistuvat myös karkeammille metallihiukkasille tulostusjauheiden käsittelyn, tulostimen latauksen ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä, kun taas pien- ja nanohiukkasia voi muodostua kappaleiden jälkikäsittelyssä (Graff ym., 2016, Ljunggren ym., 2019, Chen ym., 2020, Jensen ym., 2020, Azzougagh ym., 2021, Leso ym., 2021, Sousa ym., 2021, Dugheri ym., 2022, Oddone ym., 2022).

Metallien 3D-tulostamisen työhygieniää on tutkittu kuitenkin vasta rajallisesti. Ihoaltistumista ja metallien esiintymistä tulostustyöntekijöiden biomonitorointinäytteissä on tarkasteltu seurantalutkimuksessa, jossa riskinhallintatoimia kehittämällä pystyttiin alentamaan työntekijöiden nikkelipitoisuuksia (Ljunggren ym., 2019, 2021). Viitteitä varhaisista terveysvaikutuksista saatiin tutkimalla eri vaikutusbiomarkkereita altistuneilla työntekijöillä. Työntekijöiltä kerätyissä näytteissä havaittiin lievästi kohonneita metallipitoisuuksia virtsassa ja veressä sekä muutoksia varhaisten vaikutusten biomarkeripitoisuuksissa (Ljunggren ym., 2019, 2021; Assenhöj ym., 2021). Metallikontaminaatiota oli havaittavissa myös ihopyyhintänäytteissä (Ljunggren ym., 2019). Karlsson ym. (2023) sen sijaan eivät havainneet työvuoron jälkeen kerätyissä virtsanäytteissä kohonneita pitoisuuksia verrattuna ennen työviikkoa kerättyihin näytteisiin tai altistumattomaan verrokiryhmään. 3D-tulostusyrityksille tehdystä kyselytutkimuksesta 59 % vastaajista raportoi kokeneensa työssään hengitysoireita vähintään kerran viikossa (Chan ym., 2018).

Metallien 3D-tulostuksessa käytetään monenlaisia metallijauheita, mm. eri terästyyppisiä, titaania, alumiinia ja lejeerinkejä (Vallabani ym., 2022). Solutoksisuustestit ovat osoittaneet, että metalliset tulostusjauheet ovat vain heikosti toksisia lyhytaikaisessa altistuksessa, mutta niiden on havaittu aiheuttavan mm. DNA-muutoksia (Lewinski ym., 2019, Tang ym., 2020, Vallabani ym., 2022). Tulehdusmekanismien on todettu vaikuttavan monien metallien, kuten esim. nikkelin ja koboltin perimämyrkyllisyyteen (ECHA, 2018, 2022). Tutkimuksissa on myös havaittu, että

metallien 3D-tulostuksessa ilmaan vapautuvien hiukkasten alkuainekoostumus muuttuu lähtöaineeseen verrattuna (Graff ym., 2016, Azzougagh ym., 2021, Vallabani ym., 2022), joten altistumista arvioitaessa tulee selvittää sekä lähtöaineen kemiallinen koostumus että ilmassa liikkuvien hiukkasten kemialliset ominaisuudet (Wright & Baccarelli 2007, Jaishankar ym., 2014). Lisäksi hiukkasten morfologia ja massa vaikuttavat niiden aerodynamiikkaan ja keuhkodepositioon, joten hiukkasten fyysiset ominaisuudet tulee myös tuntea, jotta altistumista ja terveysriskejä voidaan luotettavasti arvioida (Crowder ym., 2002). Olemassa olevan tutkimustiedon perusteella ei vielä tiedetä, liittyykö erilaisten metallien käyttöön lähtöaineena erityisiä riskejä, joskin tutkimusnäyttö viittaa siihen, että kevyemmät metallimateriaalit voivat lisätä hiukkasaltistumista (Chen ym., 2020).

Työntekijöiden altistumiseen liittyvän vähäisen tutkimustiedon vuoksi riskinhallinta alalla ei ole vielä yhdenmukaista (Chen ym., 2020, Leso ym., 2021, Sousa ym., 2021, Dugheri ym., 2022). Tässä tutkimuksessa saatiin kattava yleiskuva tulostustyöntekijöiden altistumisesta hiukkasille ja metalleille eri työvaiheissa. Työntekijöiden kokonaisaltistumista selvitettiin määrittämällä metallipitoisuudet ilma- ja ihopyyhintänäytteissä sekä biologisissa näytteissä. Lisäksi tutkimuksessa saatiin tietoa varhaisista tulehdusvaikutuksista ja työntekijöiden oireista. Hanke tuotti uutta ja laajaa tutkimustietoa työhygieniasta, altistumisreiteistä sekä kokonaisaltistumisesta metallien 3D-tulostustöissä, mikä edistää alan työturvallisuuden ja riskienhallinnan kehittämistä.

2 Tavoitteet

Hankkeen tavoitteina oli

1. selvittää hiukkas- ja metallialtistumista metallien 3D-tulostuksen eri työvaiheissa sekä kartoittaa altistumisen kannalta merkittävimmät työvaiheet
2. kartoittaa työntekijöiden kokemia oireita kyselytutkimuksella
3. selvittää työntekijöiden kokonaismetallialtistumista ilma-, ihopyyhintä- ja biomonitorointinäytteiden avulla
4. selvittää metallien 3D-tulostuksen varhaisia tulehdusvaikutuksia
5. arvioida metallien 3D-tulostuksen aikaista terveysriskiä ja laatia ohjeistus turvalliseen työskentelyyn metallien 3D-tulostustöissä

3 Aineisto ja menetelmät

Ennen aineiston keruuta tutkimukselle haettiin eettinen puolto Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiirin alueelliselta tutkimuseettiselta toimikunnalta (HUS/6736/2023).

3.1 Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteina oli 8 yritystä ja 5 korkeakoulua, joissa tehdään metallien 3D-tulostusta. Kaikissa kohteissa oli käytössä jauhepetitulostin, jossa laitteen poistoilma oli joko johdettu suoraan poistoilmakanavaan tai suodatettu. Mittauskohteissa oli tyypillisesti 1–2 metallitulostinta samassa tilassa. Tulostustyöstä erotettiin neljä erilaista työvaihetta: 1) 3D-tulostus, 2) tulostimen valmistelu ja/tai purkaminen, 3) jauheen käsittely tai siivilöinti ja 4) valmiiden kappaleiden jälkikäsittely. Tulostusjauheiden siivilöintiä tehtiin joko omassa huoneessaan tai sille oli varattu tila tulostustilan tai muun tilan yhteydessä. Usein jauheen käsittelyn yhteydessä käytettiin kohdepoistoa. Jälkikäsittelylle ei aina ollut omaa tilaa, eikä kohdepoistoja tai hiukkasten leviämistä estäviä ratkaisuja aina hyödynnetty. Altistumista jälkikäsittelyssä vapautuville hiukkasille oli pyritty vähentämään mm. imupöydillä tai käsittelemällä kappaleita suljetussa kaapissa (ns. glove-box).

Mittauskohteissa tulostuksessa käytettiin erilaisia metallijauheita riippuen tulostettavasta tuotteesta. Mittauspäivinä kussakin kohteessa oli käytössä 1–3 erilaista jauhetta, joiden metallikoostumukset vaihtelivat. Jauheiden päämetallikomponentit on listattu taulukossa 1. Jauheet saattoivat sisältää pieniä määriä (alle 1 paino-%) myös muita metalleja, joita ei ole taulukossa mainittu. Eri tutkimuskohteissa käytetyistä 3D-tulostusjauheista pyydettiin näytteet mikro- ja spektroskopia-analyysyjä varten mittausten yhteydessä.

Taulukko 1: Mittauskohteet ja tutkitut työvaiheet kussakin kohteessa.

Kohde	Tulostusjauheiden päämetallit	Tutkitut työvaiheet			
		Tulostus	Tulostimen valmistelu ja/tai purkaminen	Jauheen käsittely, siivilöinti	Valmiiden kappaleiden jälkikäsittely
1	Fe, Cr, Ni, Mo, Mn	x	x	x	
2	Fe, Cr, Ni, Mo, Mn	x	x	x	x
3	Fe, Ni, Co, Mo	x	x	x	
4	Fe, Cr, Ni, Mo, Mn	x	x	x	x
5	Fe, Cr, Ni, Mo, Mn	x	x	x	x
6	Fe, Co, Cr, Ni, Mo, Mn	x	x	x	
7	Fe, Co, Cr, Nb, Ni, Mo, Mn, Ti	x	x	x	x
8	Al, Fe, Cr, Ni, Mo, Mn, Ti, V	x	x	x	x
9	Al, Fe, Cr, Ni, Mo, Mn	x	x	x	x
10	Fe, Co, Cr, Cu, Ni, W			x	x
11	Fe, Ni, Co, Mo, Ti	x	x		x
12	Fe, Ni, Co, Cr, Mo, Mn	x	x	x	x
13	Fe, Ni, Cr, Nb, Mo, Ti, Co	x	x	x	

3.2 Mittaukset

Kaikissa tutkimuskohteissa tehtiin työhygieeniset mittaukset tavanomaisen toiminnan aikana. Vapaaehtoisilta työntekijöiltä kerättiin mittauspäivän aikana hiukkas-, ihopyyhintä- ja biomonitorointinäytteitä. Työntekijöille annettiin täytettäväksi lomake, johon he kirjasivat työvuorojensa aikaiset työtehtävänsä ja niiden kestot. Työntekijät vastasivat lisäksi kyselyyn, jolla kartoitettiin työtapoja, suojautumista, oireita ja tausta-altistumista. Riippuen mittauskohteen tuotantotilanteesta, tutkittavat työvaiheet vaihtelivat kohteissa (taulukko 1). Mittaukset tehtiin kussakin kohteessa kahden peräkkäisen päivän aikana joulukuun 2023 ja toukokuun 2024 välisenä aikana.

3.2.1 Jauheanalytiikka

Mittauskohteissa pyydettiin näytteet neitseellisistä (käyttämättömistä) ja kierrätetyistä 3D-tulostusjauheista. Työkaluteräksestä 316L sekä maraging-teräksestä ja sen kondensaatista saaduille näytteille tehtiin hiukkasten morfologia- ja alkuainekoostumusanalyysjä, joilla selvitettiin, muuttuuko tulostusjauheen fysikaalinen tai kemiallinen koostumus käytön ja kierrätyksen aikana. Kondensaatilla tarkoitetaan 3D-tulostusprosessin aikana sulanutta tai kaasuuntunutta metallia, joka on kovettunut hiukkasiksi viiletessään ja jota voi kerääntyä 3D-tulostimien sisäseinämiin. Näytteiden morfologiaa ja alkuainekoostumusta tarkasteltiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM; Zeiss Sigma HDVP, Carl Zeiss NTS), johon oli yhdistetty energiadiispersiivinen röntgenspektrometri (EDS; Thermo Pathfinder v1.4, Fisher Scientific). Mikroskopianäytteet esikäsiteltiin tekemällä tutkituista jauheista tasalaatuiset dispersiot. Alkuainekoostumus selvitettiin näytteistä kolmen pisteen keskiarvona SEM-kuvantamisen yhteydessä.

3.2.2 Työhygieeniset mittaukset

Altistumista hiukkasille ja metalleille 3D-tulostustöiden aikana selvitettiin useilla menetelmillä. Kohteissa mitattiin hiukkasten massa- ja lukumääräpitoisuuksia, keskimääräistä hiukkaskokoa, lukumääräkokojakautumaa sekä keuhkoihin deposoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuutta (LDSA). Käytetyt laitteet ja menetelmät on koottu taulukkoon 2. Käytetyt mittalaitteet perustuvat eri tekniikoihin ja mittaavat eri hiukkaskokoalueita.

Hengitysvyöhykemittauksissa IOM-pumppu (AirChek 224, SKC), DISCmini ja Partector 2 Pro asetettiin reppuun, joka annettiin työntekijän kannettavaksi. IOM-keräin ja letku kiinnitettiin repun olkaimeen. Keräin kiinnitettiin muoviletkulla pumppuun ja näyte kerättiin tilavuusvirralla 2 l/min selluloosaesterisuodattimelle (MCE, halkaisija 25 mm, huokoskoko 0,8 µm), joka oli asetettu keräimen sisällä olevaan suodatinkasettiin. IOM-näytteitä kerättiin koko työvuorojen ajalta 18 operaattorin hengitysvyöhykkeeltä ja yhteensä 33 kiinteästä mittauspisteestä. Kiinteän pisteen IOM-näytteissä keräin, letku ja pumppu kiinnitettiin telineeseen n. 1,4 m:n korkeudelle. Työntekijöiden hengitysvyöhykenäytteistä (n = 18) ja osasta kiinteiden pisteiden näytteistä (n = 27) määritettiin metallipitoisuudet IOM-suodattimilta induktiivisesti kytketyllä plasma-massaspektrometrillä (ICP-MS).

Jatkuvatoimiset mittalaitteet (DISCmini, DustTrak DRX, DustTrak II, NanoScan, Partector 2 Pro ja P-Trak) sijoitettiin mittauskohteissa pöydälle tai telineeseen ja mittauspaikat valittiin niin, että laitteilla saatiin mitattua kattavasti hiukaspitoisuuksia erilaisten 3D-

tulostustöiden läheisyydessä. DustTrak-laitteiden massapitoisuudet korjattiin kullekin mittaushetkelle korjauskertoimella, joka laskettiin jakamalla laitteen sisäisen suodattimen (MCE, halkaisija 37 mm, huokoskoko 0,8 µm) massapitoisuus kokonaismassapitoisuuden (DustTrak DRX:ssä PM₁₅, DustTrak II:ssa PM₁₀) keskiarvolla. Sekä IOM- että DustTrak-suodattimet punnittiin ennen mittauksia ja niiden jälkeen vakio-olosuhdehuoneessa. Partector 2 Pro -laitteella mitattiin mittaushetkellä hiukkasia kiinteässä mittauspisteessä ensimmäisenä mittauspäivänä ja työntekijän hengitysvyöhykkeeltä toisena mittauspäivänä.

Taulukko 2: Hiukkasmittauksissa käytetyt mittalaitteet ja menetelmät.

Laite/ menetelmä	Mitattava suure	Yksikkö	Kokoalue	Mittaus- paikka
DISCmini (Testo) ^{a)}	Lukumääräpitoisuus, keskihalkaisija, LDSA	#/cm ³ , nm, µm ² /cm ³	20–700 nm	hv ja kp
DustTrak DRX 8533 (TSI) ^{a)}	Massapitoisuus	mg/m ³	0,1–15 µm	kp
DustTrak II 8530 (TSI) ^{a)}	Massapitoisuus	mg/m ³	0,1–10 µm	kp
IOM-keräin (SKC) ^{b)}	Massapitoisuus	mg/m ³	< 100 µm	hv ja kp
NanoScan (SMPS) 3910 (TSI) ^{a)}	Lukumääräpitoisuus, lukumääräkokojakauma	#/cm ³	10–420 nm	kp
Partector 2 Pro (Naneos) ^{a)}	Lukumääräpitoisuus, keskihalkaisija, lukumääräkokojakauma, LDSA	#/cm ³ , nm, µm ² /cm ³	10–300 nm	hv ja kp
P-Trak 8525 ^{a)} (TSI)	Lukumääräpitoisuus	#/cm ³	20 nm–1 µm	kp

a) jatkuvatoiminen, suoraan osoittava mittalaite, b) suodatinkeräys, hv = hengitysvyöhyke, kp = kiinteä mittauspiste, LDSA (lung-deposited surface area) = keuhkoihin depositeutuvien hiukkasten pinta-ala

Ihon kautta tapahtuvaa altistumista arvioitiin keräämällä työntekijöiden käsistä pyyhintänäytteitä, joista analysoitiin pitoisuudet niille metalleille, joita mittauspäivinä käytetyt tulostusjauheet kussakin kohteessa sisälsivät. Työntekijöiden dominoivasta

kädestä kerättiin pyyhintänäyte kostutetulla pyyhintälinalla (Ghost Wipes, SKC Europe). Näyte kerättiin ennen työvuoron alkua käsien pesun jälkeen ja altistavan työvaiheen tai työpäivän päätteeksi ennen käsien pesua. Pyyhinnöissä käytettiin vakioitua pyyhintämenetelmää, jolla varmistettiin, että jokaisen osallistujan kämmenen molemmat puolet sekä sormet pyyhittiin samalla tavalla (Porras ym., 2019, Scheepers ym., 2021).

Metallien määrittystä varten pyyhintäliinat hajotettiin mikroaaltomärkäpoltolla CEM Mars 6 Ghost Wipe -hajotusmenetelmää soveltaen. Standardit ja kontrollit esikäsiteltiin näytteiden tapaan. Metallipitoisuudet analysoitiin ICP-MS-tekniikalla. Määrittysrajat ja mittausepävarmuudet ovat riippuvaisia metallista ja ne olivat keskimäärin 20 % (9–50 %). Menetelmässä määritetyt tulokset sisältävät aina metallin kokonaismäärän (metalli + yhdisteet). Tulokset on ilmoitettu käden pinta-alaa kohden (miehen käsi 535 cm², naisen käsi 445 cm²) (US EPA, 2011).

3.2.3 Biomonitorointi

Biomonitoroinnissa mitataan biologisesta näytteestä tiettyä kemikaalia, sen aineenvaihduntatuotetta tai sen biologista vaikutusta. Altistumisen biomarkerit, virtsan ja hengitysilman metallipitoisuudet, kertovat elimistön sisäisestä altistumisesta. Vaikutusbiomarkerit, hengitysilman tulehdusmarkerit ja poskisolujen muutokset, auttavat selvittämään altistumiseen liittyviä varhaisia terveysvaikutuksia.

Biomonitorointinäytteitä kerättiin vapaaehtoisilta metallien 3D-tulostustehtävissä työskenteleviltä työntekijöiltä sekä altistumattomilta verrokeilta. Tutkimukseen osallistui 32 työntekijää ja 15 verrokkia (taulukko 3). Osallistujista 18 oli operaattoreita ja he työskentelivät tyypillisesti kokopäiväisesti metallien 3D-tulostukseen liittyvissä työtehtävissä (tulostimen valmistelu ja purkaminen, tulostusjauheen käsittely, valmiiden kappaleiden jälkikäsittely). Muiden työntekijöiden (n=14) työtehtävät sisälsivät mm. toimistotöitä, käyntejä tulostustilassa sekä työskentelyä muissa tiloissa. Verrokeiksi haettiin työntekijöitä, jotka eivät altistu metalleille työssään. Verrokkien ikä- ja sukupuolijakauma sekä tupakointitottumukset pyrittiin sovittamaan mahdollisimman tarkasti yhteen 3D-tulostustyöntekijöiden kanssa (taulukko 3).

Taulukko 3: Tutkimukseen osallistuneet työntekijät ja verrokkit.

	Operaattorit (n=18)	Muut työntekijät (n=14)	Verrokkit (n=15)
Sukupuoli, mies/nainen	94 % / 6 %	93 % / 7 %	93 % / 7 %
Tupakointi			
• tupakoi	22 %	0 %	13 %
• käyttää muita tupakkatuotteita	22 %	0 %	27 %
Tausta-altistuminen			
• kodin lähellä (alle 3 km) teollisuus- tai polttolaitos	17 %	14 %	13 %
• metalleihin liittyvä harrastus (esim. ammunta, metsästys, metallityöt)	44 %	43 %	13 %
• metallinen kehonsisäinen implantti, hammasraudat tai amalgamipaikkoja hampaissa	22 %	29 %	20 %
Diagnosoidut sairaudet			
• astma	22 %	21 %	7 %
• allerginen nuha	17 %	36 %	7 %
• atooppinen iho	6 %	7 %	7 %
• sydänsairaus	0 %	0 %	7 %
Työvuodet nykyisessä työssä			
• alle 1	33 %	14 %	13 %
• 1-3	39 %	36 %	27 %
• 3-5	11 %	0 %	13 %
• yli 5	17 %	50 %	47 %
Tulostukseen käytetty aika			
• alle 1 päivä/viikko	17 %	64 %	
• 1-3 päivää/viikko	28 %	29 %	
• yli 3 päivää/viikko	56 %	7 %	

Työntekijöiltä kerättiin virtsanäytteet ennen työviikon alkua ja tutkitun työvuoron päätteeksi kehonsisäisen metallipitoisuuden määrittämiseksi. Virtsan metallipitoisuus kuvastaa edeltävien 1–3 vuorokauden aikaista altistumista. Alumiinin kohdalla virtsan alumiinimittaus kertoo myös elimistöön pidemmän ajan kuluessa kertyneen alumiinin määrästä. Virtsanäytteet jäähdytettiin mahdollisimman pian keräämisen jälkeen ja säilytettiin pakastettuina ennen analysointia. Näytteenkeräys- ja säilytysastiat oli puhdistettu 10 % typpihapolla taustakontaminaation minimoimiseksi.

Työntekijöiltä kerättiin uloshengitysilmakondensaatti (EBC) -näyte ennen työvuoron alkua ja työvuoron päätteeksi. Näyte kerättiin hengittämällä 15 min ajan jäähdytyslaitteeseen kiinnitettyyn steriiliin keräimeen (Turbo DECCS System, Medivac Srl, Italia). Keräimeen tiivistynyt hengitysilman sisältämä kosteus jäädettiin välittömästi kuivajällä ja säilytettiin -80 °C:ssa ennen analysointia. Näytteestä analysoitiin metallien ja tulehdusmarkkereiden pitoisuudet. EBC-näytteen metallipitoisuus kuvastaa pääasiassa edeltävien tuntien aikana tapahtunutta hengitysaltistumista. Tulehdusmarkkereiden pitoisuuden avulla voidaan arvioida keuhkojen akuuttia tulehdusreaktiota.

Metallipitoisuudet (Fe, Ni, Cr, Mo, Ti, Al, Co, Cu, Mn, Pb, Se, Bi, Zn, Sn, V, W) virtsa- ja EBC-näytteistä analysoitiin käyttäen ICP-MS tekniikkaa (Thermo iCAP RQ ICP-MS, Thermo Fisher Scientific Inc.). Liuokset valmistettiin ultrapuhdastaan veteen (18.2 MΩ cm). Ennen mittausta virtsanäytteet laimennettiin 1/20 ja EBC-näytteet 1/100 2 % typpihapolla (Super purity nitric acid, Romil, Ltd., Cambridge, UK). Mittauksissa käytettiin ICP-MS-laatusia standardeja (Merck KGaA, Darmstadt, Germany, Romil, Ltd., Cambridge, UK ja Aristar, VWR, International LLC), Työterveyslaitoksen laboratoriossa valmistettuja lisäyskontrolleja sekä kaupallisia kontrolleja (ClinChek® Urine Control, lyophil., for Trace Elements, Level I, II sekä Lyphocheck® Urine Metals Control, Level I, II). Sisäisinä standardeina käytettiin skandiumia (Sc), galliumia (Ga), germaniumia (Ge), yttriumia (Y), rodiumia (Rh), iridiumia (Ir), indiumia (In) sekä platinaa (Pt).

Tulosten vakioimiseksi kaikista virtsanäytteistä määritettiin ominaispaino eli virtsan suhteellinen tiheys ja kreatiniinipitoisuus. Jos virtsa on laimeaa (suhteellinen tiheys alle 1,010 tai kreatiniini alle 0,34 g/l (3 mmol/l)), on tuloksen tulkinta epävarma.

Keuhkojen tulehdusreaktiosta kertovien markkereiden (IL-1beta, TNF-alpha, IL-6, IL-8, INF-gamma) pitoisuudet analysoitiin ennen työvuoroa ja työvuoron jälkeen kerätyistä EBC-näytteistä käyttäen kaupallista analyysikittiä (Human Inflammatory Cytokine Cytometric Bead Array, BD Biosciences, NJ, USA) kitin ohjeita noudattaen. Analysointiin käytettiin virtaussytometriä (CytoFlex S, Beckman Coulter, Brea, CA, USA) ja CytExpert 2.3 -ohjelmistoa.

Lisäksi työntekijöiltä kerättiin irtosolunäytteitä posken sisäpuolelta limakalvolta. Poskisolunäytteestä on mahdollista tutkia perimämyrkyllisten kemikaalien aiheuttamia solumuutoksia mikroskooppianalyysiin perustuen (Bolognesi ym., 2015). Näytteet kerättiin harjalla molempien poskien sisäpinnalta, siirrettiin välittömästi näytelaseille ja käsiteltiin suihkutettavalla fiksatiivilla. Näytteet värjättiin ja säilöttiin myöhempää analysointia varten.

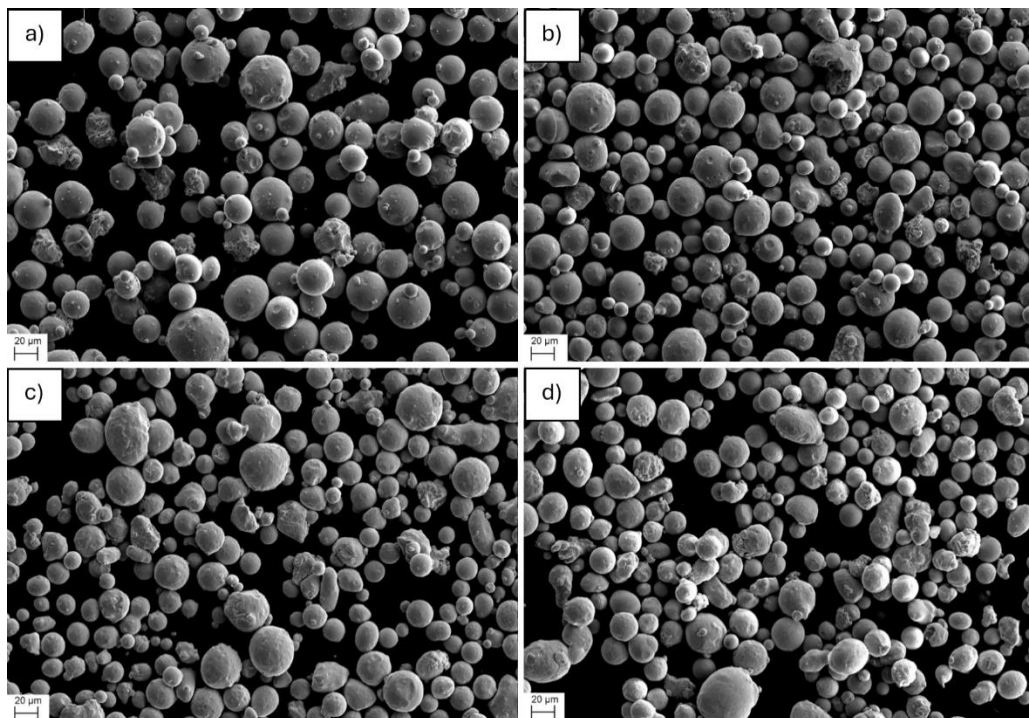
3.3 Kyselyt

Tutkittaville työntekijöille ja verrokeille annettiin täytettäväksi kyselylomake (liite 1). Lomakkeessa oli seuraavat osiot: 1) työpaikka ja työtehtävät; 2) koulutustausta; 3) metallialtistumiseen ja altistumisen varhaisiin vaikutuksiin vaikuttavat taustatiedot ja 4) oirekysely. Oirekyselyn pohjana oli Chanin ym. (2018) 3D-tulostustyöntekijöiden oireiden selvittämiseen käyttämä kysely. Kyselyä muokattiin ja täydennettiin lisäkysymyksillä tätä hanketta varten.

4 Tulokset ja niiden tarkastelu

4.1 Jauheanalytiikka

SEM-EDS-analyysien perusteella näytteiden alkuainekoostumuksissa havaittiin vain vähäisiä muutoksia kierrätyksen seurauksena (taulukko 4). Hapen lisääntymistä nähtiin vähäisissä määrin, mikä viittaa pinnan hapettumiseen tulostus-kierrätysprosessin aikana. Jauheiden morfologisessa tarkastelussa huomattiin pieniä eroja neitseellisen ja kierrätetyn jauheen sekä kondensaattihiukkasten välillä. Näihin eroihin kuuluvat mm. pinnan karkeuden muutokset, tulostusjauheen pinnoille kiinnittyneiden pienten epäpuhtaushiukkasten (engl. satellite particles) lisääntyminen sekä epämuodostuneiden hiukkasten lisääntyminen. Kierrätetty jauhe oli myös hieman tiiviimpää. SEM-kuvatut hiukkaset on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. SEM-kuvatut 3D-tulostusjauheet ja 3D-tulostimen sisäpinnalta kerätty kondensaattinäyte.
a) = työkaluteräs 316L (neitseellinen), b) = työkaluteräs 316L (kierrätetty), c) = maraging-teräs (neitseellinen), d) = maraging-teräs (kondensaatti)

Taulukko 4: Jauhenäytteiden alkuainekoostumus (massa-%).

Näyte	C	Si	Mn	Fe	Cr	Ni	Mo	Ti	Co	Al	O
Työkaluteräs 316L (neitseellinen)	3,6	0,4	0,3	65,6	17,5	10,6	2,1	-	-	-	-
Työkaluteräs 316L (kierrätetty)	2,4	0,9	0,5	62,5	18,6	12,9	2,2	-	-	-	-
Työkaluteräs 316L (neitseellinen)^{a,b}	<0,1	0,7–0,9	1,2–1,9	65,5–67,8	16,8–16,9	10,8–12,1	2,1–2,6	-	0,1	-	<0,1
Työkaluteräs 316L (kierrätetty)^{a,b}	<0,1	0,6–0,8	1,3–1,9	65,7–67,6	16,9	10,9–12	2,0–2,6	-	0,1	-	<0,1
Maraging-teräs (neitseellinen)	3,8	0,1	-	65,7	-	17,1	4,4	0,7	8,0	0,1	-
Maraging-teräs (kondensaatti)	4,9	0,1	-	63,9	-	17,2	4,6	0,9	7,5	0,2	0,7
Maraging-teräs (neitseellinen)^{c,d}	≤0.1	0,1–0.4	≤1.0	66.0–68,0	0–0.5	16,9–19,0	3,5–6.0	0.3–1.2	7.0–10.0	0–0.7	-
Maraging-teräs (kierrätetty)^d	-	0–0,2	-	65,9–69,7	-	15,9–17,9	3,3–4,6	0–0,8	9,1–10,2	1,0–1,4	-

a = Heiden ym. (2019), b = Lu ym. (2022), c = Ronda ym. (2022), d = Mechali ym. (2024)

Aiemmat tutkimukset (Heiden ym., 2019, Lu ym., 2022, Mechali ym., 2024) osoittavat tämän tutkimuksen ohella, että metallijauheen kierrätys ei merkittävästi muuta jauheen alkuainekoostumusta, vaikka hapen määrän lisääntymistä on havaittu. Jauheen kemiallinen laatu säilyy siis pääosin samanlaisena. Lu ym. (2022) havaitsivat, että kierrätys aiheuttaa siirtymän partikkelikokojakaumassa kohti suurempaa hiukkaskokoa. Mechali ym. (2024) puolestaan raportoi, että pääjauheen pinnalle kertyvät hiukkaset poikkesivat kemiallisesti hieman pääjauheesta, mutta ne olivat selkeästi samaa alkuperämateriaalia. Ronda ym. (2022) totesi SEM-EDS-menetelmällä selvitetyn jauheen koostumuksen vastaavan hyvin valmistajan ilmoittamaa, mikä tukee aiempia ja tämän tutkimuksen havaintoja.

Vaikka jauheen kierrätys ei muuta sen kemiallista koostumusta merkittävästi, morfologiset muutokset ovat kuitenkin mahdollisia. Heiden ym. (2019) havaitsivat kierrätetyssä 316L-teräsjaueessa enemmän pintaan kiinnittyneitä hiukkasia ja uudelleensulaneita pintoja, mikä liittyi jauhemateriaalin sulamiseen ja kovettumiseen uudelleen 3D-tulostusprosessin aikana. Lisäksi kierrätetty jauhe oli tiheämpää. Samankaltaisia havaintoja tehtiin myös tässä hankkeessa. Vaikka kierrätetty jauhe säilytti pääosin pyöreän muotonsa, pinnan epätasaisuudet ja pintaan kiinnittyneiden hiukkasten määrä lisääntyivät hieman. Jauheen siivilöintiprosessi poistaa kuitenkin tehokkaasti agglomeraatit eli yhteen kiinnittyneet partikkelit, minkä ansiosta suuria ja yhteen sulaneita hiukkasia esiintyi vain vähän.

Mechali ym. (2024) toteaa, että maraging-teräsjauehen morfologia pysyy pitkälti muuttumattomana jauheen kierrätyksen jälkeen, mikä on linjassa tämän tutkimuksen havaintojen kanssa. Suurimmat muutokset liittyivät jauheen tihentymiseen ja pintarakenteen vähäisiin muutoksiin. Sen sijaan kondensaatti erottui ominaisuuksiltaan selvemmin varsinaisista tulostusjauheista. Kondensaattihiukkaset olivat pienempiä, pinnaltaan epäsäännöllisempiä ja sileämpiä kuin itse tulostusjauhe. Lisäksi niiden pinnalla esiintyi vähemmän kiinnittyneitä hiukkasia (engl. satellite particles). Nämä erot selittyvät kondensaatin muodostumismekanismeilla, jossa sulanut ja höyrystynyt metalli kovettuu hiukkasiksi jäähtyessään. Muodostunut kondensaatti eroaa varsinaisista 3D-tulostusjauheista morfologialtaan ja jossain määrin myös alkuainekoostumukseltaan.

4.2 Altistuminen hiukkasille

4.2.1 Suodatinnäytteet

Taulukossa 5 on esitetty IOM-keräimellä määritetyt hengittyvien hiukkasten massapitoisuudet hengitysvyöhykenäytteille (hv) ja kiinteiden mittauspisteiden (kp) näytteille. Operaattoreiden hengitysvyöhykkeellä massapitoisuudet olivat noin 72 %:ssa näytteistä alle 1 mg/m³. Joillakin työpaikoilla samassa tilassa tehtiin eri toimintoja, mutta kiinteä piste oli sijoitettu kullakin työpaikalla tietyn työpisteen viereen. Kiinteissä mittauspisteissä massapitoisuudet olivat noin 97 %:ssa näytteistä alle 1 mg/m³.

Taulukko 5: Hengittyvien hiukkasten massapitoisuudet IOM-näytteissä.

Näytteenkeräyskohde	Näytemäärä (n)	Massapitoisuus (mg/m ³)
Operaattori, hv	18	< hr-9,13
Kiinteä mittauspiste (kaikki)	31	< hr-1,20
3D-tulostus, kp	13	< hr-0,74
Jauheen käsittely, kp	9	< hr-1,20
Jälkikäsittely, kp	5	< hr-0,73
Toimisto, kp	4	< hr-0,23

hr = havaitsemisraja, hv = hengitysvyöhyke, kp = kiinteä mittauspiste

Suodatinkeräyksellä määritettyjen hengittyvien hiukkasten massapitoisuudet olivat pääasiassa alhaisia ja alittivat hengittyvän pölyn haitalliseksi tunnetun pitoisuuden (STM 2025) eli HTP_{8h}-arvon (10 mg/m³) operaattoreiden hengitysvyöhykkeillä ja kiinteissä mittauspisteissä (taulukko 5). Pitoisuudet alittivat myös Työterveyslaitoksen (2016) suositteleman hengittyvän pölyn tavoitetason (2 mg/m³) kolmea operaattoria lukuun ottamatta. Kyseisillä operaattorilla pitoisuudet (3,7; 4,0 ja 9,1 mg/m³) olivat 37–91 % HTP_{8h}-arvosta ja 184–457 % tavoitetasosta. Muilla operaattoreilla pitoisuudet olivat < 1–17 % HTP_{8h}-arvosta ja < 1–86 % tavoitetasosta. Kiinteissä mittauspisteissä pitoisuudet olivat < 1–12 % HTP_{8h}-arvosta ja < 1–60 % tavoitetasosta.

Aikaisemmissa tutkimuksissa hengittyvän pölyn massapitoisuudet ovat olleet < 0,02–1,73 mg/m³ työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä ja 0,17–1,28 mg/m³ kiinteissä mittauspisteissä (Azzougagh ym., 2021, Dugheri ym., 2022, Assenhöj ym., 2023, Karlsson ym., 2023). Tämän tutkimuksen tulokset ovat linjassa aiempien tulosten kanssa, lukuun ottamatta kolmea hengitysvyöhykenäytettä, joiden massapitoisuudet olivat > 3 mg/m³.

4.2.2 Jatkuvatoimiset mittalaitteet

Taulukossa 6 on esitetty jatkuvatoimisilla mittalaitteilla mitatut hiukkasten massapitoisuudet kiinteissä mittauspisteissä eri työvaiheissa. Tässä raportissa tarkastellaan hiukkasten PM₁₀-massapitoisuuksia. Yksittäisten työvaiheiden pitoisuudet on laskettu työntekijöiden kirjaamien työaikojen perusteella.

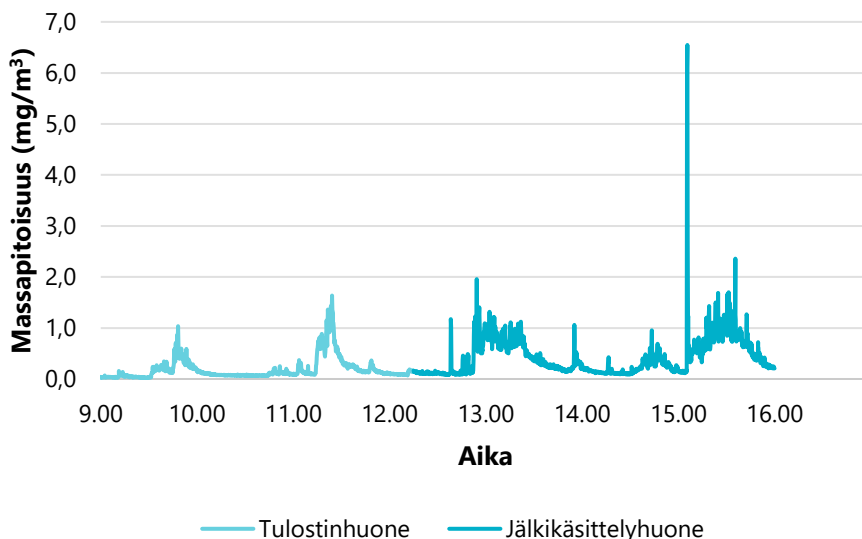
PM₁₀-hiukkasten keskimääräiset massapitoisuudet olivat alhaisia kiinteissä mittauspisteissä kaikissa mittauskohteissa (taulukko 6). Metallien 3D-tulostuksen aikaiset keskiarvopitoisuudet olivat keskimääräisten tausta- ja toimistopitoisuuksien tasolla. 3D-tulostimet olivat koteloituja ja niissä oli ilmanvaihtokanavaan liitetty poistoputki ja/tai ulostulojärjestelmän suodatusjärjestelmä. Jälkikäsittelytöiden (esim. sahaus, tukirakenteiden poisto, hiekkapuhallus) aikana mitattiin hetkellisiä korkeita pitoisuuksia muutamilla työpaikoilla. PM₁₀-hiukkasten massapitoisuudelle ei ole työperäisen altistumisen ohjearvoa.

Taulukko 6: PM₁₀-hiukkasten massapitoisuudet kiinteissä mittauspisteissä mitattuna DustTrak DRX ja DustTrak 2 -laitteilla.

Mittauskohde	n	PM ₁₀ -massapitoisuus (mg/m ³)
		Keskiarvo (vaihteluväli)
Jauheen käsittely	12	0,07 (0,00–0,62)
Tulostimen täyttö ja valmistelu	10	0,05 (0,00–1,64)
Tulostus	10	0,04 (0,00–0,09)
Tulostimen purku	11	0,01 (0,00–0,44)
Jälkikäsittely	7	0,23 (0,00–6,55)
Toimisto	2	0,03 (0,01–0,11)
Koko työpäivä	13	0,07 (0,00–6,55)
Tausta*	12	0,03 (0,00–0,58)

* = mitattu aamulla ennen työvuoron alkua, n = mittauskohteiden lukumäärä

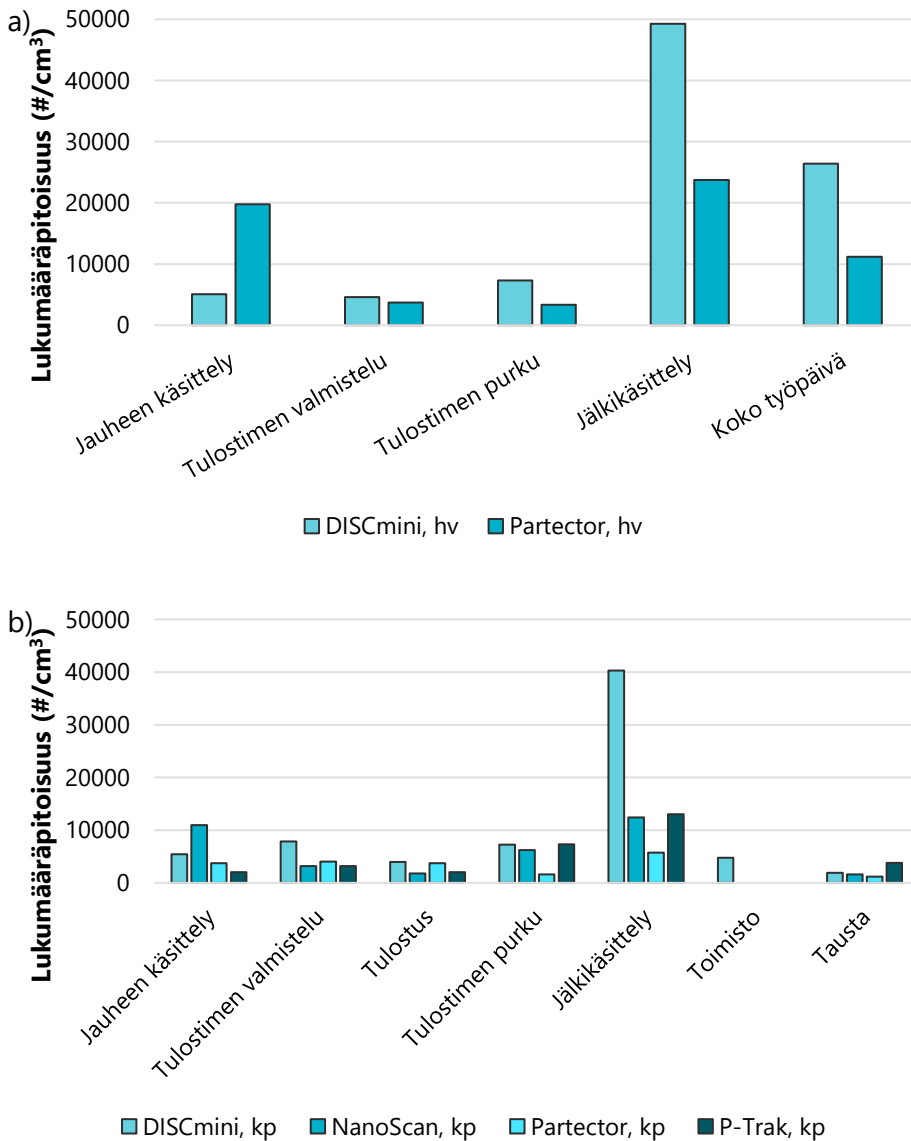
Kuvassa 2 on esitetty esimerkki työpäivän aikaisesta massapitoisuuden vaihtelusta yhdellä työpaikalla. Kuvasta huomataan, että PM₁₀-massapitoisuudet kohosivat hetkellisesti työpäivän aikana. Tulostinhuoneessa korkein pitoisuuspiikki (1,64 mg/m³) havaittiin tulostimen täytön aikana (klo 11.24). Jälkikäsittelyhuoneessa pitoisuus oli korkeimmillaan (6,55 mg/m³) osien viimeistelytöiden jälkeen (klo 15.05).



Kuva 2. DustTrak DRX -laitteella mitattu työpäivän aikainen PM₁₀-massapitoisuus yhdellä työpaikalla

PM₁₀-hiukkasten massapitoisuuksia on tarkasteltu kahdessa aiemmassa tutkimuksessa (Azzougagh ym., 2021, Assenhøj ym., 2023), joissa pitoisuudet vaihtelivat eri työvaiheissa välillä < 0,01–1,2 mg/m³. Korkeimmat pitoisuudet mitattiin tulostimen huoltotoimenpiteiden aikana. Tämän tutkimuksen tulokset ovat pääosin samansuuntaisia aiempien tutkimusten tulosten kanssa, mutta tässä tutkimuksessa mitattiin korkeampia hetkellisiä pitoisuuksia jälkikäsittelytöissä.

Kuvassa 3 on esitetty jatkuvatoimisilla mittalaitteilla mitattujen hiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot eri työvaiheissa. Hiukkasten keskimääräiset lukumääräpitoisuudet vaihtelivat eri työvaiheissa välillä 3 400–49 300 #/cm³ operaattorien hengitysvyöhykkeellä ja välillä 1 200–40 300 #/cm³ kiinteissä mittauspisteissä (kuva 3). Keskiarvopitoisuudet olivat korkeimmat jälkikäsittelytöissä ja jauheen käsittelyssä, muissa työvaiheissa pitoisuudet olivat alhaisia. Metallien 3D-tulostuksessa keskiarvopitoisuudet olivat kiinteissä mittauspisteissä samalla tasolla kuin keskimääräiset tausta- ja toimistopitoisuudet. Mittalaitteiden väliset erot tuloksissa johtuvat luultavasti mittauspisteiden etäisyyksistä sekä laitteiden eri mittausalueista ja -periaatteista.



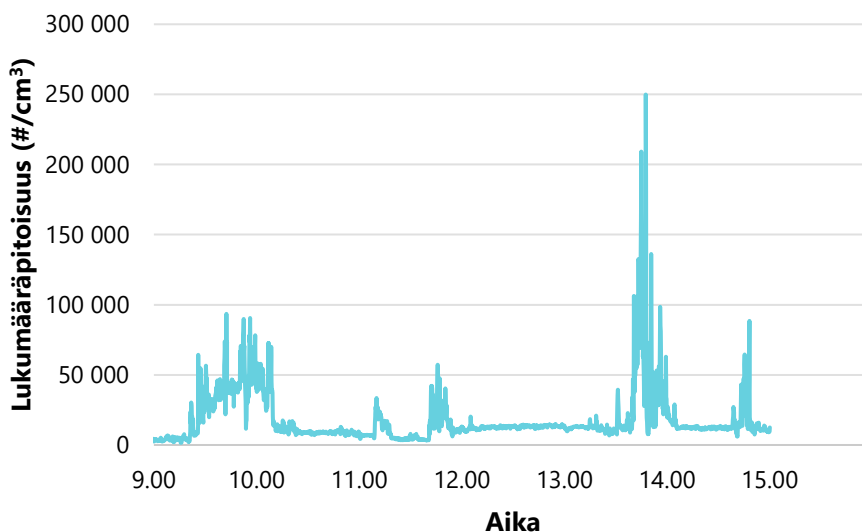
Kuva 3. Hiukkasten keskimääräiset lukumääräpitoisuudet työvaiheittain (a) operaattorien hengitysvyöhykkeellä (hv) ja (b) kiinteissä mittauspisteissä (kp) eri mittalaitteilla mitattuna. Taustamittaus tehtiin ennen työvaiheen alkua.

Hiukkasten lukumääräpitoisuuksille ei ole työperäisen altistumisen ohjearvoa. Työterveyslaitos (2013) on ehdottanut 8 h tavoitetasoksi teollisesti tuotetuille nanomateriaaleille (tiheys $> 6\,000\text{ kg/m}^3$) $20\,000\text{ \#/cm}^3$. Keskimääräiset lukumääräpitoisuudet ylittivät jälkikäsittelyssä tavoitetason, tosin jälkikäsittelytyöt olivat useimmilla työpaikoilla lyhytkestoisia. Kolmasosalla operaattoreista hiukkasten keskimääräinen lukumääräpitoisuus koko työvuoron aikana ylitti ehdotetun tavoitetason DISCmini-laitteella mitattuna. Yhdellä pelkästään jälkikäsittelyä tehneellä operaattorilla mitattiin selvästi muita operaattoreita korkeampi pitoisuus ($362\,000\text{ \#/cm}^3$), mikä nosti kaikkien mittausten keskimääräisen hiukkaspitoisuuden tavoitetason yläpuolelle. Operaattorit käyttivät hengityksensuojainta altistavia työtehtäviä tehdessään, joten heidän todellinen altistumisensa oli mitattuja pitoisuuksia alhaisempaa.

Aiemmissa tutkimuksissa lukumääräpitoisuudet ovat vaihdelleet välillä $600\text{--}1\,700\,000\text{ \#/cm}^3$ työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä ja $6\,000\text{--}300\,000\text{ \#/cm}^3$ kiinteissä mittauspisteissä (Lewinski ym., 2019, Jensen ym., 2020, Azzougagh ym., 2021, Sousa ym., 2021, Assenhøj ym., 2023, Kangas ym., 2023, Karlsson ym., 2023, Pernetti ym., 2023). Korkeimmat pitoisuudet on mitattu jälkikäsittelyssä. Tämän tutkimuksen tulokset ovat pääosin samansuuntaisia kuin edellisten tutkimusten tulokset, mutta tässä tutkimuksessa maksimipitoisuudet olivat korkeampia jälkikäsittelytöissä ($5\,600\,000\text{ \#/cm}^3$ hengitysvyöhykkeellä ja $4\,700\,000\text{ \#/cm}^3$ kiinteässä mittauspisteessä).

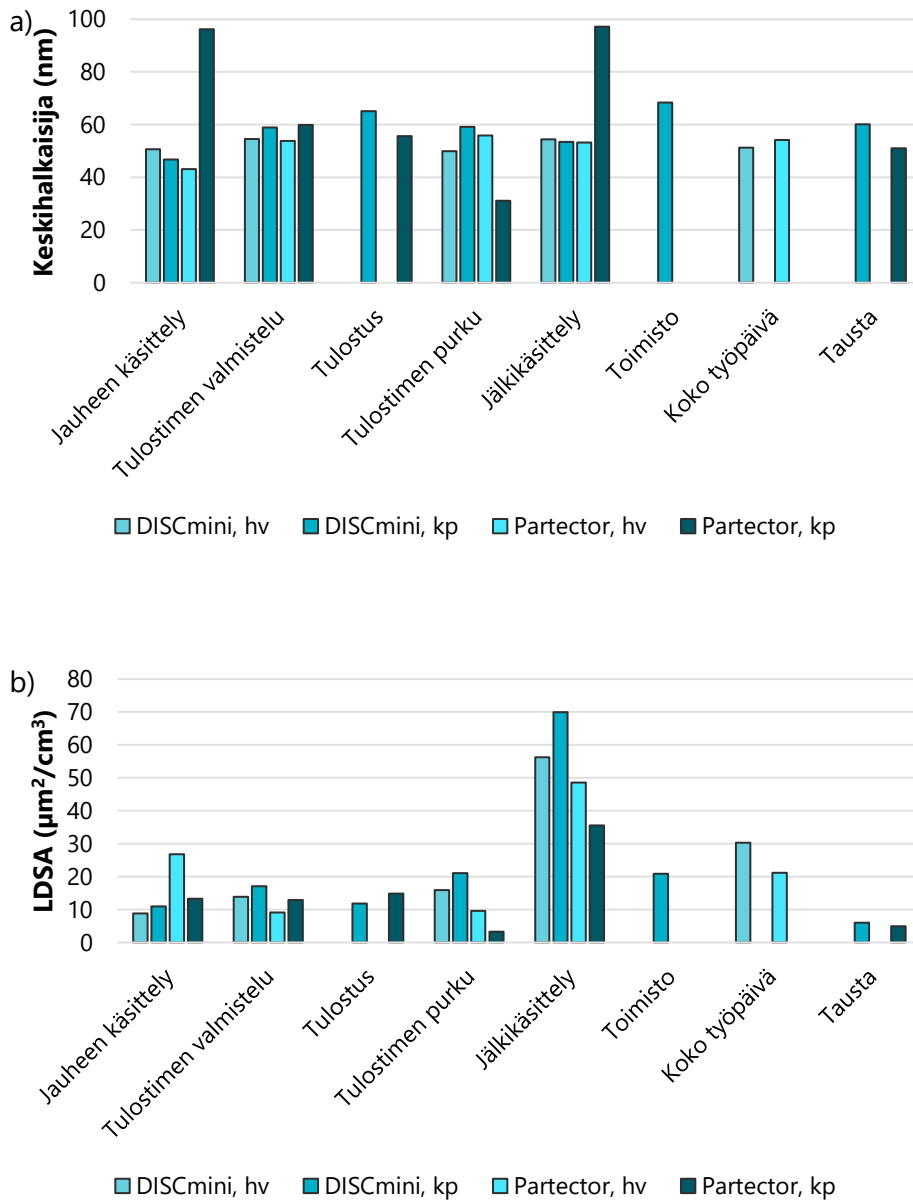
Viitanen ym. (2017) tarkastelivat kirjallisuuskatsauksessaan eri alojen työpaikoilla mitattuja hiukkasten lukumääräpitoisuuksia. Perinteisessä metalliteollisuudessa $5,5\text{--}1\,000\text{ nm}$ hiukkasten pitoisuudet ovat olleet $1\,000\text{--}1\,700\,000\,000\text{ \#/cm}^3$ (keskiarvo: $5\,000\text{--}1\,650\,000\text{ \#/cm}^3$). Tietyissä metalliteollisuuden työtehtävissä maksimipitoisuudet ovat olleet $1\,000\text{--}50\,000$ -kertaiset verrattuna tässä tutkimuksessa mitattuihin pitoisuuspiikkeihin.

Kuvassa 4 on esitetty esimerkki työpäivän aikaisesta $10\text{--}300\text{ nm}$ hiukkasten lukumääräpitoisuuden vaihtelusta operaattorin hengitysvyöhykkeellä yhdellä työpaikalla. Työntekijä täytti 3D-tulostimia ja teki jälkikäsittelytyötä vuorotellen päivän aikana. Korkeimmat hiukkasten lukumääräpitoisuudet mitattiin jälkikäsittelytyöiden (vaihteluväli $3\,100\text{--}250\,000\text{ \#/cm}^3$) aikana, kun työvaiheet olivat kestoltaan yli 30 min. Korkein pitoisuuspiikki havaittiin alumiinin jälkikäsittelyssä (klo 13.47). Lyhytkestoisissa työvaiheissa pitoisuudet olivat huomattavasti alhaisemmat.



Kuva 4. Partector 2 Pro -laitteella mitattu työpäivän aikainen 10–300 nm hiukkasten lukumääräpitoisuus operaattorin hengitysvyöhykkeellä yhdellä työpaikalla.

Hiukkasten keskikoko ja keskimääräinen keuhkoihin depositeuvien hiukkasten pinta-ala (LDSA) operaattoreiden hengitysvyöhykkeellä ja kiinteissä mittauspisteissä eri työvaiheissa on esitetty kuvassa 5. Hiukkasten keskikoko oli eri mittauskohteissa välillä 43–56 nm operaattorien hengitysvyöhykkeellä ja 47–97 nm kiinteissä mittauspisteissä (kuva 5a). Keskimääräinen hiukkaskoko oli alhaisin jauheen käsittelyssä hengitysvyöhykkeellä (Partector 2 Pro) ja tulostimen purkamisessa kiinteissä mittauspisteissä (Partector 2 Pro). Hiukkasten keskimääräinen keuhkocodeposituiva pinta-ala (LDSA) oli suurin jälkikäsittelytöissä, missä keskiarvot vaihtelivat välillä 49–56 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ operaattorien hengitysvyöhykkeellä ja 36–70 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ kiinteissä mittauspisteissä (kuva 5b). Tulosten perusteella hiukkasten lukumääräpitoisuudet korreloivat hyvin LDSA:n kanssa.

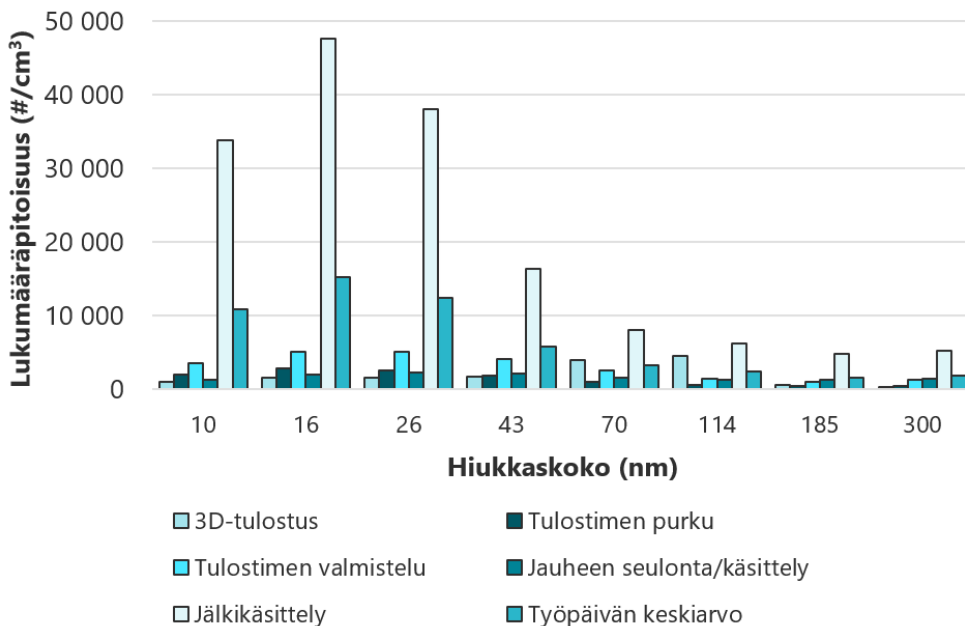


Kuva 5. Hiukkasten (a) keskikoko ja (b) keskimääräinen keuhkodeposituva pinta-ala (LDSA) työvaiheittain operaattorien hengitysvyöhykkeellä (hv) ja kiinteissä mittauspisteissä (kp) eri mittalaitteilla mitattuna. Taustamittaus tehtiin ennen työvuoron alkua.

Edellisissä tutkimuksissa hiukkaskoko on vaihdellut eri työvaiheissa seuraavasti: jauheen käsittelyssä 40 nm (Kangas ym., 2023), tulostuksessa 60 nm (Lewinski ym., 2019), tulostimen purkamisessa 15–28 nm (Jensen ym., 2020) ja jälkikäsittelyssä 50–80 nm (Jensen ym., 2020). Kyseiset tulokset ovat osittain linjassa tässä tutkimuksessa saatujen tulosten kanssa.

Hiukkasten keuhkodeposituvaa pinta-alaa (LDSA) on mitattu kahdessa aiemmassa tutkimuksessa, joissa LDSA vaihteli välillä 3–80 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (Jensen ym., 2020, Kangas ym., 2023). Tämän tutkimuksen tulokset ovat samalla tasolla kyseisten tulosten kanssa.

Kuvassa 6 on esitetty Partector 2 Pro -laitteella saatu hiukkasten lukumääräkokojakauma. Kuvaan on yhdistetty operaattorien hengitysvyöhykkeeltä (mittausten lukumäärä 43) ja kiinteistä mittauspisteistä (mittausten lukumäärä 28) kerätty data (x-akselilla hiukkaskoko, y-akselilla keskimääräinen lukumääräpitoisuus). Lukumääräpitoisuudet olivat keskimäärin korkeimmat jälkikäsittelytöissä kaikissa hiukkaskokoluokissa. Korkeimmat pitoisuudet mitattiin 10–26 nm alueella. Lewinskin ym. (2019) tutkimuksessa lukumääräpitoisuudet olivat korkeimmillaan eri työvaiheissa, kun hiukkaskoko oli 50–100 nm.



Kuva 6. Partector 2 Pro -laitteella mitattu hiukkasten lukumääräkokojakauma työvaiheittain. Operaattorien hengitysvyöhykkeiltä ja kiinteistä mittauspisteistä kerätty data on yhdistetty kuvaan.

4.3 Altistuminen metalleille

4.3.1 Ilmanäytteet

Taulukkoon 7 on koottu IOM-näytteistä analysoitujen metallien pitoisuudet hengitysvyöhykkeillä ja kiinteissä pisteissä. Tulokset kuvaavat koko työpäivän aikaista altistumista. Suodatinnäytteiden metallipitoisuudet olivat yleisesti alhaisia. HTP-arvoon (STM 2025) suhteutettuna hengitysvyöhykenäytteissä korkeimmat maksimipitoisuudet olivat nikkelillä, koboltilla, alumiinilla ja kuparilla. Näiden maksimipitoisuuksien %-osuudet HTP-arvoista olivat 576 % (Ni), 309 % (Co), 116 % (Al) ja 102 % (Cu). HTP-arvojen ylityksiä havaittiin kuitenkin vain yksittäisissä näytteissä (n = 7). Suodatinnäytteet kerättiin operaattoreiden hengityksensuojaimen ulkopuolelta. Ilman hengityksensuojaimia operaattoreiden altistuminen näissä tapauksissa olisi ollut liiallista. Altistuminen kromille oli kohtalaista yhdellä työntekijällä (maksimipitoisuus 16 % HTP-arvosta), muiden metallien (Fe, Mn, Mo, Pb, Sn) maksimipitoisuuksien %-osuudet HTP-arvoista olivat < 1–8 % yksittäisten työntekijöiden näytteissä.

Kiinteiden pisteiden näytteissä HTP-arvoon suhteutettuna korkeimmat pitoisuudet havaittiin koboltilla, nikkelillä, kromilla, alumiinilla ja kuparilla, tosin kaikissa näytteissä pitoisuudet alittivat HTP-arvon. Edellä mainittujen metallien maksimipitoisuuksien %-osuudet HTP-arvoista olivat 77 % (Co), 57 % (Ni), 14 % (Cr), 13 % (Al) ja 12 % (Cu). Muiden metallien maksimipitoisuuksien %-osuudet HTP-arvoista olivat < 1–6 % yksittäisissä näytteissä.

Metallien massapitoisuuksia hengittyvän pölyn näytteissä on tarkasteltu kahdessa aiemmassa tutkimuksessa (Assenhøj ym., 2023, Karlsson ym., 2023), joissa pitoisuudet olivat < 0,01–140 µg/m³ hengitysvyöhykenäytteissä ja 0,17–1,28 mg/m³ kiinteiden pisteiden näytteissä. Mangaanin pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä (< 0,01–7,65 µg/m³) olivat samansuuntaisia kuin tässä tutkimuksessa mitattu pitoisuus. Sen sijaan edellisissä tutkimuksissa muiden tutkittujen metallien (Co, Cr, Fe, Mo ja Ni) massapitoisuudet olivat alhaisemmat hengitysvyöhykenäytteissä ja kiinteiden pisteiden näytteissä verrattuna tässä tutkimuksessa mitattuihin pitoisuuksiin.

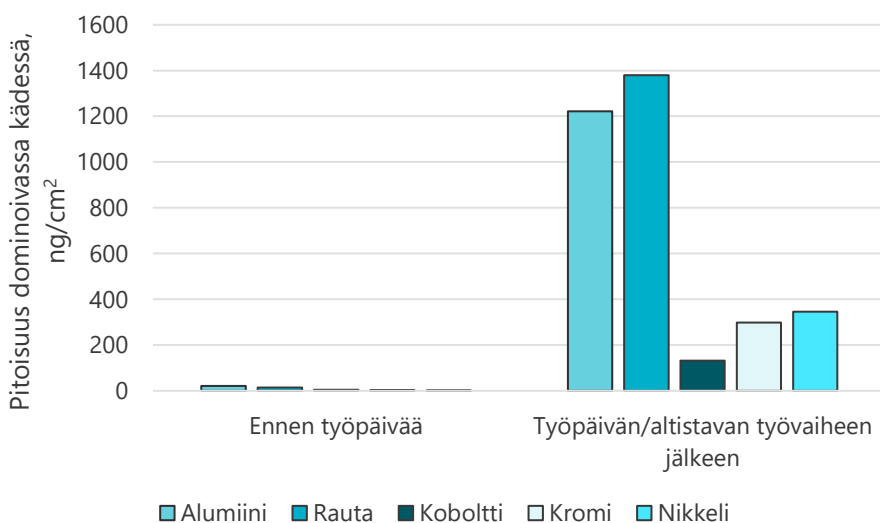
Taulukko 7: Metallipitoisuudet hengittyvän pölyn näytteissä.

Metalli	Massapitoisuus (µg/m ³)		
	hv (n = 18)	kp (n = 27)	HTP _{8h} -arvo
Al, alumiini	< mr– 1 163,5	0,5–128,7	1 000 ^{a)}
Bi, vismutti	< mr–< 0,1	< mr–< 0,1	–
Co, koboltti	< 0,1– 61,8	< 0,1–15,4	20
Cr, kromi	0,1–81,9	< 0,1–68,6	500 ^{b)}
Cu, kupari	< 0,1– 20,4	< 0,1–2,4	20
Fe, rauta	4,0–424,3	0,5–103,4	5 000 ^{c)}
Mn, mangaani	< 0,1–4,3	< 0,1–12,7	200
Mo, molybdeeni	< 0,1–30,2	< mr–7,5	500
Ni, nikkeli	0,3– 287,8	< mr–28,3	50 ^{d)}
Pb, lyijy	< mr–< 0,1	< mr–< 0,1	100 ^{d)}
Sn, tina	< mr–0,3	< mr–<0,1	2 000
Ti, titaani	< mr–162,9	< mr–88,2	–
V, vanadium	< 0,1–6,9	< mr–3,8	–
Zn, sinkki	< 0,1–1,4	< mr–0,6	–

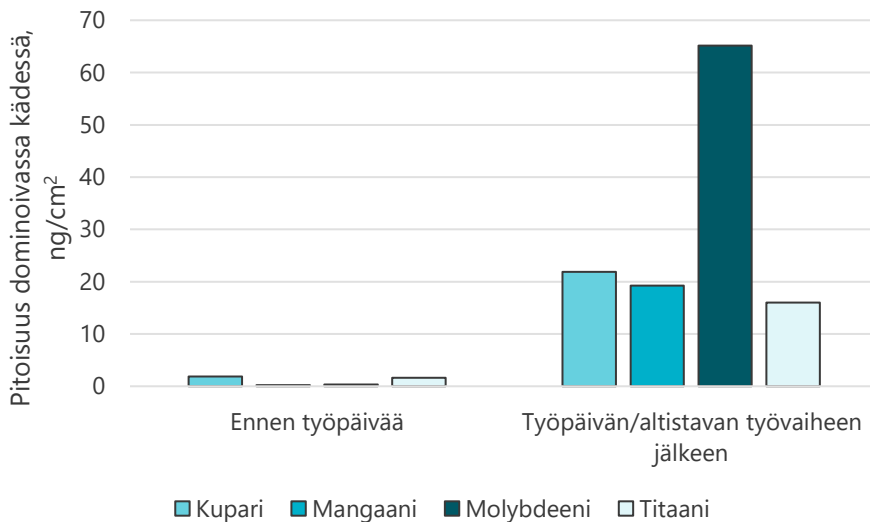
a) = alumiini ja sen niukkaliukoiset yhdisteet, b) = kromi ja sen (II,III)-yhdisteet, c) = rautaoksidi, huuрут, d) = sitova raja-arvo, jota työntekijöiden altistuminen ei saa ylittää, HTP_{8h}-arvo = haitalliseksi tunnettu pitoisuus (STM 2025), hv = hengitysvyöhyke, kp = kiinteä piste, mr = määrittäysraja, n = näytemäärä

4.3.2 Käsienpyyhintänäytteet

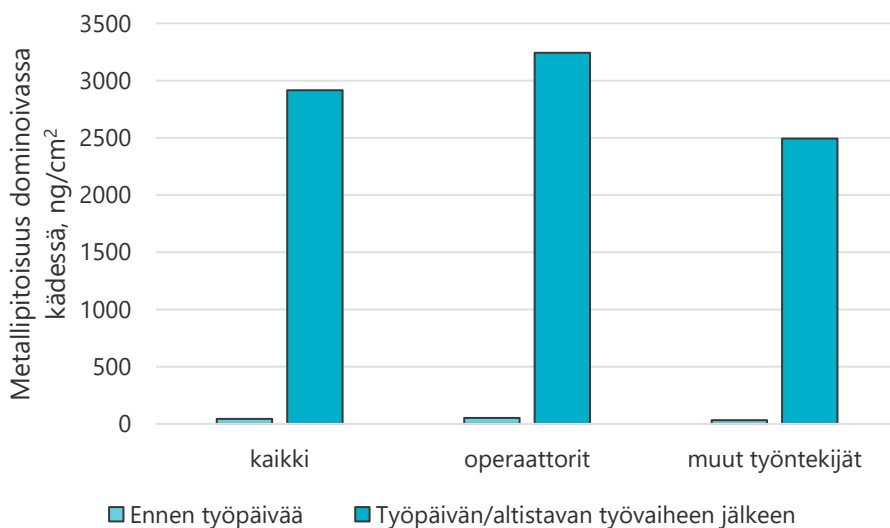
Metallien keskimääräiset pitoisuudet käsienpyyhintänäytteissä olivat selkeästi korkeammat työvuoron tai altistavan työvaiheen jälkeen verrattuna ennen työpäivää otettuihin näytteisiin. Ennen työpäivää näytteet otettiin juuri pestyistä käsistä ja eri metallien pitoisuudet olivat hyvin alhaisia, usein alle menetelmän määrittysrajan. Työpäivän jälkeen käsienpyyhintänäytteissä mitattiin suurimpina pitoisuuksina rautaa ja alumiinia, joita seurasivat nikkeli, kromi ja koboltti (kuva 7). Myös molybdeeniä, kuparia, mangaania ja titaania mitattiin työpäivän jälkeen selkeästi suurempina pitoisuuksina (kuva 8). Vain 1–3 mittauskohteessa käytetyt tulostusjauheet sisälsivät pieninä pitoisuuksina lyijyä, seleeniä, sinkkiä, tinaa, vanadiinia, vismuttia ja volframia. Näiden metallien pitoisuudet olivat pieniä käsienpyyhintänäytteissä. Tuloksista laskettiin myös metallien yhteispitoisuus työntekijän dominoivassa kädessä. Tämä yhteispitoisuus oli jonkun verran korkeampi operaattoreilla kuin muilla työntekijöillä (kuva 9).



Kuva 7. Alumiinin, raudan, koboltin, kromin ja nikkelin keskimääräiset pitoisuudet työntekijöiden käsienpyyhintänäytteissä ennen työvuoroa ja työvuoron tai altistavan työvaiheen jälkeen.



Kuva 8. Kuparin, mangaanin, molybdeenin ja titaanin keskimääräiset pitoisuudet työntekijöiden käsipyyhintänäytteissä ennen työvuoroa ja työvuoron tai altistavan työvaiheen jälkeen.



Kuva 9. Metallien keskimääräiset yhteispitoisuudet työntekijöiden käsipyyhintänäytteissä ennen työvuoroa ja työvuoron tai altistavan työvaiheen jälkeen.

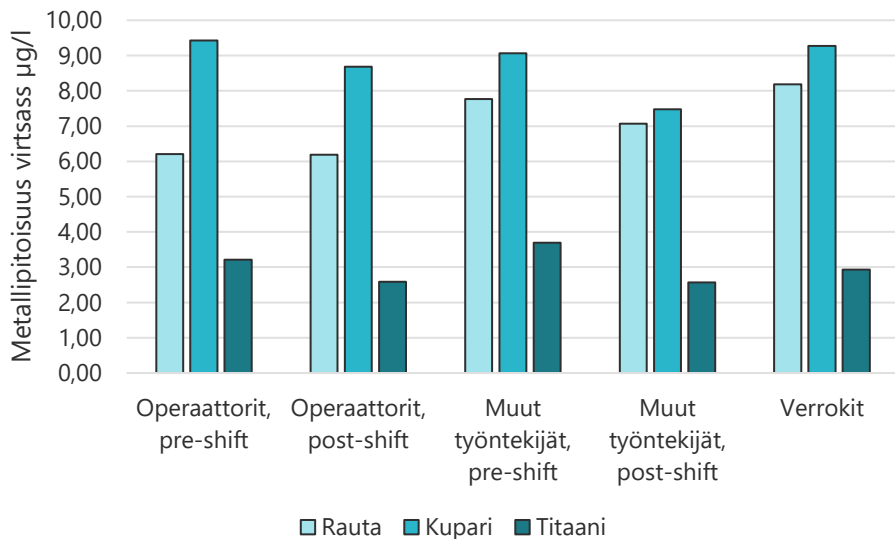
Käsienpyyhintänäytteille ei ole olemassa raja-arvoja, joihin mitattuja tuloksia voitaisiin verrata. Samaa ihoaltistumisen mittaumenetelmää on käytetty laajassa Euroopan laajuisessa kromialtistumista kartoittaneessa tutkimuksessa eri metallialan työympäristöissä (Viegas ym., 2022) ja siinä keskimääräiset kromipitoisuudet työntekijöiden käsissä olivat samaa luokkaa kuin tässä tutkimuksessa. Teräksen tuotannossa käsien kromipitoisuudet jäivät alle määritysrajan. Maalauksessa, laboratorio- ja ylläpitotöissä kromipitoisuus oli keskimäärin 100 ng/cm^2 , työstössä/koneistuksessa 200 ng/cm^2 ja hitsauksessa 300 ng/cm^2 , mutta termisessä ruiskutuksessa kromipitoisuus oli käsissä jopa $18\,500 \text{ ng/cm}^2$. Tässä tutkimuksessa metallien 3D-tulostuksessa kromin pitoisuudet olivat keskimäärin 300 ng/cm^2 .

Metallien 3D-tulostuksessa on aiemmin Ruotsissa mitattu operaattorien käsistä teippimenetelmällä keskimääräiset pitoisuudet koboltille (110 ng/cm^2), kromille (370 ng/cm^2) ja nikkelille (630 ng/cm^2) (Ljunggren ym., 2019). Tässä tutkimuksessa mitatut nikkelipitoisuudet olivat matalampia, mutta kromi- ja kobolttipitoisuudet olivat samalla tasolla.

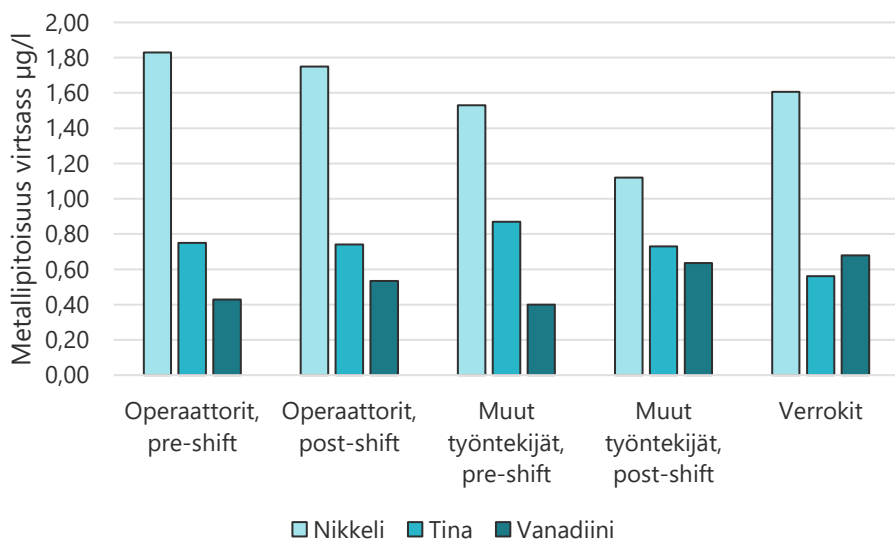
Metallit eivät juurikaan imeydy terveen ihon läpi, mutta voivat kulkeutua käsistä eri pinnoille sekä etenkin suuhun ja edelleen elimistöön, mikäli henkilökohtaisesta hygieniasta ei huolehdita. Käsineiden vaihtaminen tarpeeksi usein (Viegas ym., 2022) ja huolellinen käsienpesu aina tulostustöiden jälkeen on tärkeää metallipölyn leviämisen ja mahdollisen altistumisen vähentämiseksi.

4.3.3 Virtsanäytteet

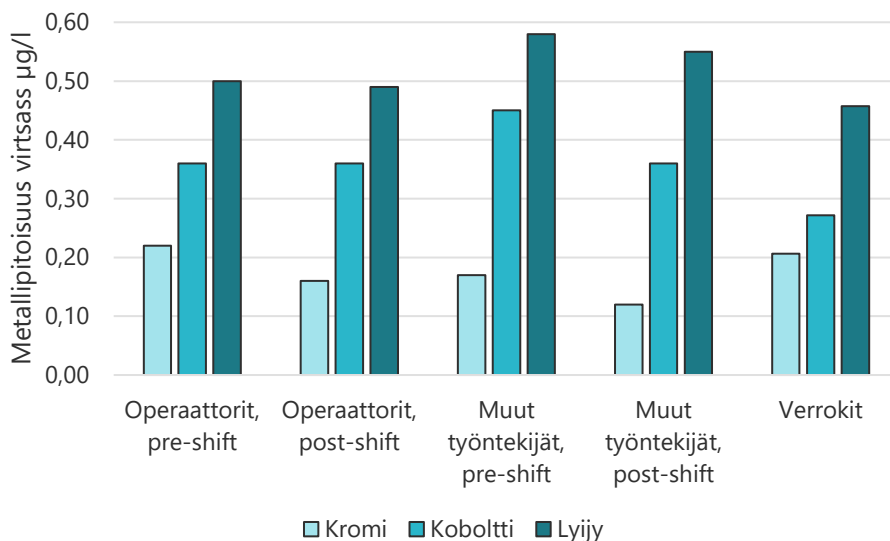
Operaattoreilla tai muissa 3D-tulostustehtävissä toimivilla ei havaittu merkittävästi korkeampia virtsan metallipitoisuuksia kuin tutkimuksen verrokkiryhmällä. Työvuoron jälkeen kerätyissä virtsanäytteissä ei havaittu korkeampia metallipitoisuuksia verrattuna ennen työviikkoa kerättyihin näytteisiin. Raudan, kuparin ja titaenin keskimääräiset pitoisuudet on esitetty kuvassa 10. Nikkelin, tinan ja vanadiinin keskimääräiset pitoisuudet on koottu kuvaan 11. Kromin, koboltin ja lyijyn keskimääräiset pitoisuudet on esitetty kuvassa 12. Tulokset on vakioitu virtsan ominaispainon suhteen.



Kuva 10. Raudan, kuparin ja titaanin keskimääräiset pitoisuudet virtsanäytteissä ennen työviikkoa (pre-shift) ja työvuoron jälkeen (post-shift). Tulokset on vakioitu virtsan ominaispainon suhteen.



Kuva 11. Nikkelin, tinan ja vanadiinin keskimääräiset pitoisuudet virtsanäytteissä ennen työviikkoa (pre-shift) ja työvuoron jälkeen (post-shift). Tulokset on vakioitu virtsan ominaispainon suhteen.



Kuva 12. Kromin, koboltin ja lyijyn keskimääräiset pitoisuudet virtsanäytteissä ennen työviikkoa (pre-shift) ja työvuoron jälkeen (post-shift). Tulokset on vakioitu virtsan ominaispainon suhteen.

Aiemmissa tutkimuksissa on raportoitu vastaavia biomonitorointituloksia. Metallien 3D-tulostustyöntekijöillä mitattiin Ruotsissa hieman korkeampia virtsan nikkeli-, kromi- ja kobolttipitoisuuksia verrattuna toimistotyöntekijöihin, mutta pitoisuudet eivät kohonneet työviikon aikana (Ljunggren ym., 2019). Karlsson ym. (2023) mittasivat kromin, koboltin, raudan, molybdeenin ja nikkelin pitoisuuksia 3D-tulostustyöntekijöiden virtsanäytteissä, mutta eivät havainneet työvuoron jälkeen kerätyissä näytteissä kohonneita pitoisuuksia verrattuna ennen työviikkoa kerättyihin näytteisiin tai altistumattomaan verrokkiryhmään. Työntekijöiden käyttämien hengityksensuojainten todettiin vähentävän tehokkaasti altistumista 3D-tulostustöissä vapautuville metallihiukkasille (Ljunggren ym., 2019, Karlsson ym., 2023).

Kunkin työntekijäryhmän virtsan metallipitoisuuksien 95-persentiili sekä alle määritysrajan jääneiden näytteiden prosenttiosuudet on esitetty taulukossa 8. Taulukkoon on lisätty myös Työterveyslaitoksen määrittämät altistumattomien viiteraja-arvot, jotka perustuvat työssään kemikaaleille altistumattoman, tupakoimattoman väestön tuloksiin (Työterveyslaitos 2023). Altistumattomien viiteraja on taso, joka alittuu 95 %:lla työssään altistumattomasta suomalaisesta työikäisestä väestöstä. Viiterajan ylitys viittaa ylimääräiseen kemikaalialtistumiseen, joka saattaa johtua työperäisestä altistumisesta.

Taulukko 8: Virtsan metallipitoisuuksien 95-persentiili (µg/l) työntekijäryhmittäin ja alle määritysrajan jääneiden näytteiden prosenttiosuudet sekä Työterveyslaitoksen asettamat altistumattomien viiteraja-arvot. Tulokset on vakioitu virtsan ominaispainon suhteen.

Metalli	Operaattorit pre-shift	Operaattorit post-shift	Muut työntekijät pre-shift	Muut työntekijät post-shift	Verrokki	Altistumattomien viiteraja-arvo (Työterveyslaitos 2023)
Rauta	9,49 (0 %)	9,38 (0 %)	16,12 (0 %)	13,08 (0 %)	15,14 (0 %)	-
Molybdeeni	119,29 (0 %)	127,09 (0 %)	97,00 (0 %)	154,40 (0 %)	133,10 (0 %)	100
Kupari	16,11 (0 %)	13,44 (0 %)	12,59 (0 %)	11,02 (0 %)	14,68 (0 %)	64
Nikkeli	3,72 (0 %)	3,53 (0 %)	3,42 (0 %)	2,79 (0 %)	3,63 (0 %)	4,5*
Kromi	0,42 (0 %)	0,26 (0 %)	0,29 (0 %)	0,19 (7 %)	0,78 (7 %)	0,3
Titaani	4,22 (0 %)	3,40 (0 %)	5,63 (0 %)	3,37 (0 %)	3,83 (0 %)	7
Alumiini	3,48 (33 %)	4,79 (61 %)	3,98 (64 %)	3,82 (79 %)	7,47 (80 %)	8
Koboltti	1,10 (0 %)	0,94 (0 %)	1,54 (0 %)	1,18 (0 %)	0,71 (0 %)	1,5
Mangaani	0,10 (0 %)	0,07 (33 %)	0,13 (0 %)	0,11 (21 %)	0,31 (20 %)	0,2
Lyijy	0,92 (6 %)	0,86 (11 %)	1,24 (7 %)	1,14 (14 %)	0,89 (27 %)	0,9
Seleen	46,05 (0 %)	34,72 (0 %)	42,16 (0 %)	40,87 (0 %)	37,29 (0 %)	59**
Vanadiini	0,92 (0 %)	0,86 (0 %)	0,79 (0 %)	0,96 (0 %)	1,02 (0 %)	0,4
Tina	1,91 (11 %)	1,87 (11 %)	2,48 (14 %)	1,95 (21 %)	1,40 (13 %)	2
Volframi	0,17 (78 %)	0,21 (83 %)	0,20 (86 %)	0,20 (93 %)	0,40 (93 %)	-
Vismutti	0,09 (72 %)	0,10 (83 %)	0,07 (93 %)	0,05 (93 %)	0,09 (100 %)	-

*Uusi viiteraja-arvo kesäkuusta 2025 alkaen. ** Vastaa viiteraja-arvoa 50 µg/g kreatiniinia.

Kun työntekijäryhmien 95-persentiilejä verrataan altistumattomien viiteraja-arvoihin, havaitaan molybdeenin, kromin, koboltin, mangaanin, lyijyn, vanadiinin ja tinan 95-persentiilien ylittävän altistumattomien viiterajan. Mitatut pitoisuudet ovat kuitenkin edelleen väestössä normaalisti tavattavalla tasolla. On huomioitava, että altistumattomien viiteraja on asetettu siten, että noin 5 % työssään altistumattomasta väestöstä ylittää normaalistikin kyseisen viiterajan ympäristöperäisen altistumisen takia. Väestön taustapitoisuuksissa saattaa olla alueellisia eroja ja joidenkin metallien, kuten molybdeenin, raudan, sinkin ja seleenin pitoisuuksiin, on ravitsemuksellisilla tekijöillä merkittävä vaikutus. Altistumattomien viiteraja ei kerro mahdollisista terveydellisistä haitoista.

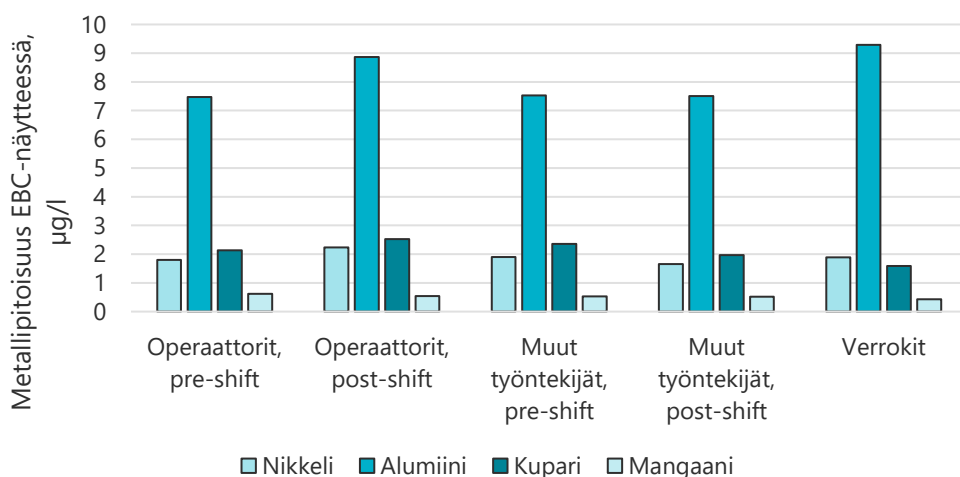
Osa viiterajan ylittävistä metallipitoisuuksista havaittiin ennen työviikkoa kerätyissä virtsanäytteissä. Lisäksi tutkimuskohteissa käytetyt tulostusjauheet sisälsivät vain harvoin lyijyä, tinaa tai vanadiinia ja silloinkin vain pieninä pitoisuuksina, joten näiden metallien pitoisuuksissa havaitut viiterajan ylitykset viittaavat altistumiseen vapaa-ajalla. Operaattorit (44 %) ja muut työntekijät (43 %) raportoivat enemmän altistavia vapaa-ajan harrastuksia kuten ammuntaa tai metalli- ja elektroniikkatöitä kuin verrokkit (13 %) (taulukko 3). Nämä harrastukset saattavat vaikuttaa erityisesti lyijyn, tinan, nikkelin ja kromin pitoisuuksiin. Lyijyn osalta terveysriskien arvioinnissa veren lyijypitoisuus on virtsaa parempi markkeri. Kaikkia hankkeeseen osallistuneita suositeltiin toimittamaan henkilökohtaiset biomonitointituloksensa työterveyshuoltoon seuranta- ja terveystarkastustarpeen arvioimiseksi.

Työterveyslaitos on asettanut joillekin metalleille biomonitoroinnin toimenpiderajan, joka perustuu toksikologiseen tietoon aineen haittavaikutuksista (Työterveyslaitos 2023). Toimenpideraja ei ylittynyt tutkimuksessa kerätyissä virtsanäytteissä minkään tutkitun metallin osalta. Yleisesti voidaan todeta, että virtsanäytteissä ei havaittu sellaisia metallipitoisuuksia, joiden katsottaisiin aiheuttavan terveyshaittoja aikuisille.

Työntekijöiden altistuminen tulee aina pyrkiä minimoimaan mahdollisimman alhaiseksi. Tutkimuskohteissa oli käytössä teknisiä toimia altistumisen rajoittamiseksi ja työtehtävissä käytettiin pääsääntöisesti asianmukaisia henkilönsuojaimia. Altistumisen minimoimisessa tulee kiinnittää huomiota lisäksi työtilojen siivoukseen sekä suojainten ja työvaatteiden puhtauteen.

4.3.4 Hengitysilmakondensaattinäytteet

Hengitysilmakondensaattien metallipitoisuudet olivat pääosin alle mittausmenetelmän määritysrajojen. Raudan, kromin, molybdeenin, titaanin, lyijyn, seleenin, sinkin, vismutin ja vanadiinin osalta yli 50 % näytteistä oli alle määritysrajan. Nikkelin, alumiinin, kuparin ja mangaanin pitoisuudet on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Nikkelin, alumiinin, kuparin ja mangaanin keskimääräiset pitoisuudet (µg/l) EBC-näytteissä ennen työvuoroa (pre-shift) ja työvuoron jälkeen (post-shift).

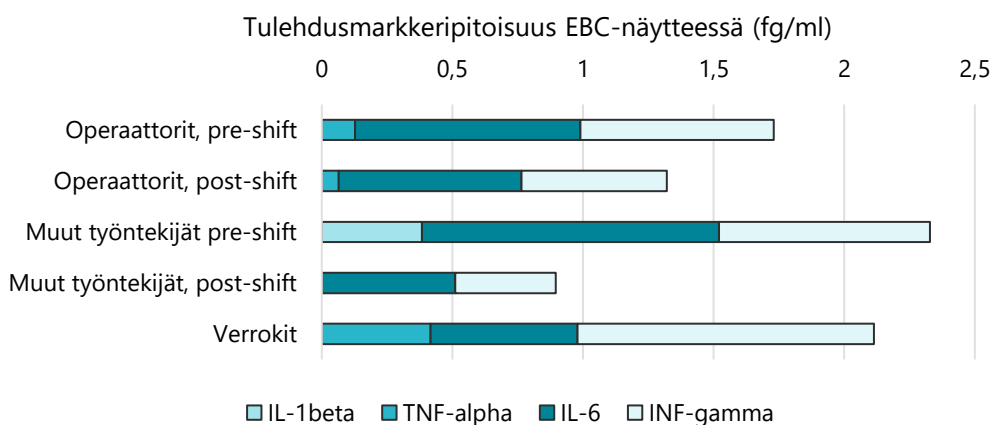
Työvuoron jälkeen kerätyissä näytteissä ei pääsääntöisesti havaittu korkeampia metallipitoisuuksia verrattuna ennen työvuoroa kerättyihin näytteisiin. Operaattoreiden ja muiden 3D-tulostustyöntekijöiden metallipitoisuudet olivat samalla tasolla hankkeen verrokkien kanssa. Vain kuparin pitoisuus oli operaattoreilla työvuoron jälkeen korkeampi verrattuna verrokkiryhmään. Työntekijöiden hengitysvyöhykenäytteissä havaittiin yksittäisiä kuparin HTP-arvon ylityksiä (102 % HTP-arvosta), mikä saattaa selittää löydöstä EBC-näytteissä. Toisaalta HTP-arvon ylityksiä havaittiin myös alumiinilla (116 %), koboltilla (309 %) ja nikkelillä (576 %), mutta näiden metallien pitoisuudet eivät olleet koholla operaattoreiden EBC-näytteissä verrokkiryhmään verrattuna.

Metallipitoisuuksien määrittystä EBC-näytteistä on käytetty työntekijöiden hengitystiealtistuksen arviointiin aiemmissa tutkimuksissa, mutta niihin ei ole sisältynyt metallien 3D-tulostusta. Hulo ym. (2014) havaitsivat hitsaushuuruille

altistuvien työntekijöiden EBC-näytteissä korkeampia nikkelin ja mangaanin pitoisuuksia kuin tutkimuksen verrokkiryhmällä; nikkelin pitoisuus oli työntekijöillä 1,00 µg/l (0,84–1,46) ja verrokeilla 0,24 µg/l (0,10–0,65). Mangaanin pitoisuus oli työntekijöillä 4,72 µg/l (2,99–17,13) ja verrokeilla 0,32 µg/l (0,16–2,47). Leese ym. (2023) puolestaan raportoivat kohonneita kolmen- ja kuudenarvoisen kromin pitoisuuksia kromialtistuneilla pintakäsittelijöillä ja hitsareilla. Tässä tutkimuksessa sekä 3D-tulostustyöntekijöiltä että verrokeilta mitattiin Hulon ym. (2014) tutkimukseen verrattuna korkeampia nikkelin ja mangaanin pitoisuuksia. Tämä liittyy todennäköisesti eroihin näytteenkeräys- ja käsittelymenetelmissä, joita ei ole tällä hetkellä standardoitu (Leese ym., 2023). EBC-näytteiden metallipitoisuuksille ei ole asetettu virallisia toimenpiderajoja, joihin tuloksia voisi verrata.

4.4 Varhaiset tulehdusvaikutukset

Metallisten huurujen tiedetään aiheuttavan hengitystieoireita ja ns. metallikuumetta. Tässä tutkimuksessa kerätyissä EBC-näytteissä operaattoreiden ja muiden 3D-tulostustyöntekijöiden tulehdusmarkkeripitoisuudet olivat matalia. Suurimmassa osassa näytteistä pitoisuudet jäivät alle mittausmenetelmän määritysrajan. IL-8 pitoisuudet olivat kaikissa näytteissä alle menetelmän määritysrajan. Tulehdusmarkkerien (IL-1beta, TNF-alpha, IL-6, INF-gamma) keskimääräiset pitoisuudet EBC-näytteissä on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Tulehdusmarkkerien (IL-1beta, TNF-alpha, IL-6, INF-gamma) keskimääräiset pitoisuudet (fg/ml) EBC-näytteissä ennen työvuoroa (pre-shift) ja työvuoron jälkeen (post-shift).

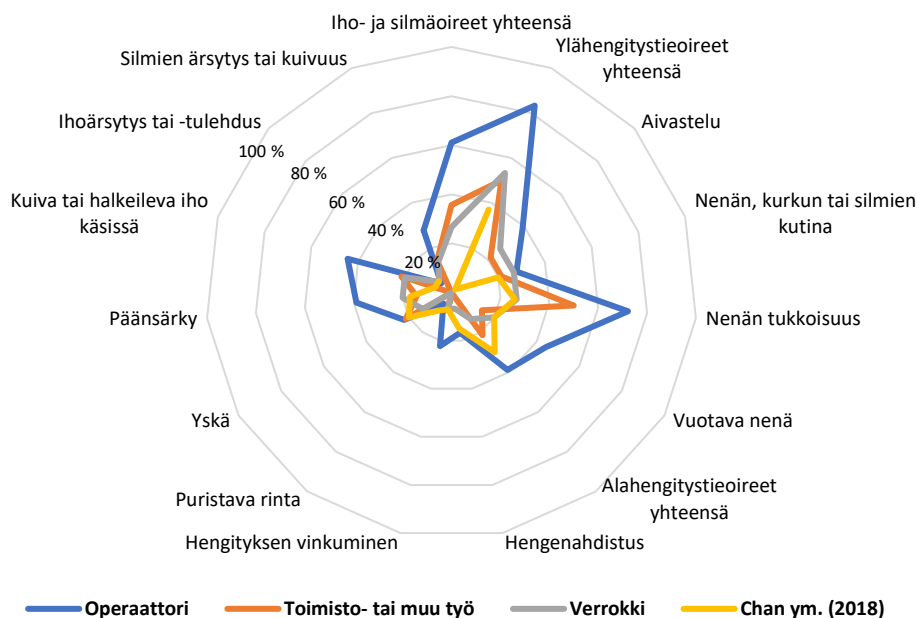
Mikäli työvuoron jälkeen kerätyissä näytteissä olisi mitattu korkeampia pitoisuuksia kuin ennen työvuoroa, olisi se saattanut viitata hengitysteitä ja keuhkoja ärsyttävään altistumiseen tutkitun työvuoron aikana. Kerätyissä näytteissä tulehdusmarkkeripitoisuudet olivat kuitenkin matalammat työvuoron jälkeen kuin ennen työvuoroa. Tulosten perusteella voidaan todeta, että operaattoreilla tai muilla työntekijöillä ei havaittu merkkejä työperäiseen altistumiseen liittyvästä keuhkojen tulehdusreaktiosta, mikä on odotettu tulos, kun metallipitoisuudet EBC-näytteissä olivat matalat.

4.5 Työntekijöiden kokemat oireet

Tutkimuksessa kartoitettiin kyselyllä tutkimuskohteissa työskentelevien henkilöiden toistuvaa oireilua viimeisen vuoden ajalta. Vastaajat jaettiin kolmeen ryhmään: 3D-tulostusoperaattorit, toimistotyötä tai muuta työtä tekevät henkilöt sekä verrokkit, jotka eivät työskentele 3D-tulostustöissä. Tuloksissa on havaittavissa eroja operaattorien ja muiden ryhmien välillä (kuva 15). Operaattorit raportoivat enemmän etenkin ylähengitystieoireita (83 %), kuivaa tai halkeilevaa ihoa käsissä (44 %) sekä silmien ärsytystä tai kuivuutta (28 %) kuin muut vastaajaryhmät (yli 20 %-yksikön ero raportointiprosentissa). Päänsärky oli myös yleistä operaattoreilla (39 %). Muissa oireissa erot ryhmien välillä eivät olleet merkittäviä. Sekoittavien tekijöiden vaikutusta oireisiin ei voida kuitenkaan poissulkea tässä pienessä otoksessa: operaattoreiden joukossa oli enemmän tupakoitsijoita verrattuna muihin työntekijöihin sekä enemmän astma- tai allerginen nuha -diagnoosin omaavia verrattuna kontrolliryhmään (taulukko 3).

Toimistotyötä tai muuta työtä tekevien oireilu oli vähäisempää ja samalla tasolla kuin verrokkiryhmällä. Vakavampia oireita, kuten hengenahdistusta (0–17 %) ja puristavaa tunnetta rinnassa (0–6 %) raportoitiin kaikissa ryhmissä vain vähän. Ylähengitystieoireita raportoineista operaattoreista 27 % arvioi oireiden olevan voimakkaampia töissä kuin vapaa-ajalla, 73 % taas arvioi oireiden olevan samalla tasolla sekä töissä että vapaa-ajalla. Alahengitystieoireita raportoineista operaattoreista 50 % arvioi oireiden olevan voimakkaampia töissä ja 50 % raportoi oireiden olevan samalla tasolla sekä töissä että vapaa-ajalla. Iho- ja silmäoireita raportoineista operaattoreista 22 % arvioi oireiden olevan voimakkaampia töissä kuin vapaa-ajalla ja 67 % raportoi oireiden olevan samalla tasolla sekä töissä että vapaa-ajalla. Vaikka osallistujamäärä oli rajallinen eikä tilastollisia merkitsevyysanalyysejä sen vuoksi tehty, tulokset antavat viitteitä siitä, että työtehtävien luonne voi vaikuttaa oireilun määrään ja laatuun.

Toistuva oireilu viime vuoden aikana



Kuva 15. 3D-tulostusoperaattorien, toimistotyötä tai muuta työtä tekevien sekä verrokkien raportoima oireilu viime vuoden ajalta. Mukana vertailuryhmänä myös Chanin ym. (2018) tutkimuksen tulokset muovien 3D-tulostusta tekevien työntekijöiden oireista.

Kyselytulokset osoittavat, että oireilu ei rajoitu pelkästään hengitysteihin, vaan myös iho ja silmät ovat alttiita. Työntekijät voivat altistua metallijauheille ja -hiukkasille esimerkiksi jauheen käsittelyssä ja jälkikäsittelytöissä. Silmien ärtyminen voi olla myös yhteydessä moottoroitujen hengityssuojainten käyttöön. Iho-oireet (kuiva tai halkeileva iho), joita esiintyi enemmän operaattoreilla, voivat liittyä suojakäsineiden käyttöön ja runsaampaan käsienpesutarpeeseen työpäivän aikana.

Chan ym. (2018) kartoittivat muovien 3D-tulostusta tekevien henkilöiden oireilua. Vertailututkimuksen vastaajat raportoivat vähemmän hengitystie- ja iho-oireita kuin tämän tutkimuksen 3D-tulostusoperaattorit. Sen sijaan heidän oireilunsa oli lähempänä tämän hankkeen toimistotyötä tai muuta työtä tekevien oireita.

Yhteenvedon voidaan todeta, että metallien 3D-tulostusoperaattoreilla lievät ylähengitystie- ja iho-oireet ovat yleisiä ja voivat olla yhteydessä 3D-tulostustyöhön. On kuitenkin huomioitava, että työntekijät käyttivät henkilönsuojaimia työssään. Kysely toteutettiin myös flunssakauden aikana, mikä voi osaltaan vaikuttaa tuloksiin, vaikkakin

kyselyssä painotettiin toistuvaa oireilua viime vuoden ajalta. Lisäksi 3D-tulostusoperaattoreissa oli enemmän tupakoitsijoita kuin toimistotyötä tai muuta työtä tekevissä sekä enemmän astmaatikkoja ja allergisesta nuhasta kärsiviä kuin verrokkiryhmässä. Pienten ryhmäkokojen vuoksi myös erot parin henkilön vastauksissa voivat vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Tutkimuksen havainnot yhdessä muun kerätyn mittausdatan kanssa kuitenkin korostavat työhygienian merkitystä ja tarvetta altistumisen vähentämistoimenpiteille.

5 Johtopäätökset ja tulosten hyödyntäminen

Tutkimuksessa selvitettiin metallien 3D-tulostuksen eri työvaiheiden aikaista hiukkas- ja metallialtistumista sekä arvioitiin tulostustöiden aiheuttamaa terveysriskiä. Tulosten perusteella altistumisen kannalta merkittävimmät työvaiheet olivat valmiiden kappaleiden jälkikäsittely ja tulostusjauheiden käsittely. Näiden työvaiheiden aikana havaittiin kohonneita hiukkaspitoisuuksia, kun taas tulostuksen aikaiset pitoisuudet olivat pääsääntöisesti alhaisia. Kolmasosalla operaattoreista työpäivän aikainen hiukkasten lukumääräpitoisuus ylitti teollisille nanohiukkasille ehdotetun tavoitetason. Lisäksi muutamassa suodatinnäytteessä massapitoisuus ylitti hengittyvän pölyn tavoitetason ja muutamien metallien pitoisuus ylitti HTP-arvon. Operaattorien todellinen altistuminen oli kuitenkin mitattuja pitoisuuksia alhaisempaa, koska he käyttivät hengityksensuojainta altistavia työtehtäviä tehdessään.

Tulostusmateriaalien kierrätys vaikuttaa tulosten perusteella enemmän jauheen morfologiaan kuin sen kemialliseen koostumukseen. Kierrätetyissä jauheissa havaittiin vähäisiä morfologisia muutoksia, kuten tiivistymistä ja pintaan kiinnittyneiden hiukkasten (engl. satellite particles) lisääntymistä. Alkuainekoostumus säilyi pääosin muuttumattomana, lukuun ottamatta vähäistä hapettumista. Muuttuneet ominaisuudet ovat altistumisen kannalta vähäisiä.

Hiukkasmittausten ja työhygieenisistä näytteistä tehtyjen analyysien perusteella metallien 3D-tulostustyössä on mahdollista altistua hienojakoiselle metallipölylle, mikäli hyvästä henkilökohtaisesta suojautumisesta ei pidetä huolta. Ihoaltistuminen ja työssä käsiteltävien metallien siirtyminen käsien kautta suuhun on mahdollista. Biomonitorointinäytteiden perusteella työntekijöiden kokonaismetallialtistuminen oli kuitenkin matalaa: työvuoron jälkeen työntekijöiden virtsasta mitatut metallipitoisuudet eivät poikenneet verrokien tai ennen työvuoroa kerättyjen näytteiden metallipitoisuuksista. Myös työntekijöiden ulohengitysilman metallipitoisuudet olivat pääsääntöisesti samalla tasolla kuin verrokeilla. Mittauskohteissa käytössä olleet tekniset toimet altistumisen rajoittamiseksi ja henkilönsuojainten (hengityksensuojaimet, käsineet, suojavaatetus) käyttö työtehtävien aikana todennäköisesti alensivat altistumista.

Operaattorit raportoivat enemmän toistuvia ylähengitystieoireita ja kuivaa tai halkeilevaa ihoa käsissä kuin muut työntekijät ja verrokkiryhmä. Muissa oireissa (esimerkiksi vakavammissa alahengitystieoireissa) ei nähty merkittäviä eroja eri ryhmien välillä. Vaikka oirekyselyn tuloksiin tulee suhtautua varauksella johtuen tutkimusryhmien pienestä koosta ja mahdollisista sekoittavista tekijöistä, metallien 3D-

tulostustyöt voivat olla yhteydessä lievään ylähengitystie- ja iho-oireiluun. Tämä korostaa työhygienian ja suojauskäytäntöjen merkitystä.

Tutkimuksessa ei havaittu merkkejä työperäiseen altistumiseen liittyvästä keuhkojen tulehdusreaktiosta. Kaiken kaikkiaan tutkituissa työtehtävissä terveysriskien voidaan katsoa jäävän mataliksi, kunhan hyvästä työhygieniasta ja suojautumisesta pidetään huolta.

Tässä hankkeessa laadittiin malliratkaisu metallien 3D-tulostustöiden turvallisiin työtapoihin. Malliratkaisu on ladattavissa Työympäristön riskienhallinnan malliratkaisut-sivustolta (www.ttl.fi/malliratkaisut). Malliratkaisussa annetaan ohjeistusta mm. altistumisen hallintaan, työjärjestelyihin sekä oikeiden henkilönsuojainten valintaan.

Työntekijöiden altistuminen tulisi aina pitää mahdollisimman alhaisena. Metallien 3D-tulostustöissä altistumisen hallintaan suositellaan nk. STOP-mallia, jossa altistumisen vähentämisen tärkeimmät keinot ovat haitallisten yhdisteiden korvaaminen vähemmän haitallisilla vaihtoehdoilla ja erilaiset tekniset toimenpiteet: tehokas ilmanvaihto, kohdepoistot sekä tilojen osastointi. Kohdepoistoja voitaisiin hyödyntää enemmän jälkikäsittelyssä, jolloin paikoin korkeatkin hiukkaspitoisuudet voitaisiin poistaa ilmasta ennen niiden leviämistä työpaikan ilmaan. Uusia 3D-tulostustiloja rakennettaessa tilojen osastointi eri toimintoja varten on suositeltavaa ottaa huomioon jo tilasuunnitteluvaiheessa. On myös tärkeää huolehtia, että työperäinen altistuminen ei lisäännä, mikäli tulostustoiminta työpaikoilla skaalautuu suuremmaksi.

Lähteet

- Assenhøj M, Ward LJ, Ghafouri B, ym. 2021. Metal exposure from additive manufacturing and its effect on the nasal lavage fluid proteome - a pilot study. *PLoS ONE* 16(8):e0256746.
- Azzougagh MN, Keller F-X, Cabrol E, ym. 2021. Occupational exposure during metal additive manufacturing: A case study of laser powder bed fusion of aluminum alloy. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 18(6):223–236.
- Bolognesi C, Roggieri P, Ropolo M, ym. 2015. Buccal micronucleus cytome assay: results of an intra- and inter-laboratory scoring comparison. *Mutagenesis* 30(4):545–555. doi:10.1093/mutage/gev017.
- Chan FL, House R, Kudla I, ym. 2018. Health survey of employees regularly using 3D printers. *Occupational Medicine* 68(3):211–214.
- Chen R, Yin H, Cole IS, ym. 2020. Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review. *Chemosphere* 259:127452.
- Crowder TM, Rosati JA, Schroeter JD, ym. 2002. Fundamental effects of particle morphology on lung delivery: Predictions of Stokes' law and the particular relevance to dry powder inhaler formulation and development. *Pharmaceutical Research* 19(3):239–245.
- Dugheri S, Cappelli G, Trevisani L, ym. 2022. A qualitative and quantitative occupational risk assessment to hazardous substances during powder-bed fusion process in metal-additive manufacturing. *Safety* 8(2):32.
- European Chemicals Agency, ECHA 2018. Committee for Risk Assessment, RAC, Opinion on scientific evaluation of occupational exposure limits for Nickel and its compounds, ECHA/RAC/ A77-O-0000001412-86-189/F, Adopted 9 March 2018. Saatavilla: https://echa.europa.eu/documents/10162/17233/nickel_opinion_en.pdf/9e050da5-b45c-c8e5-9e5e-a1a2ce908335?t=1552330145399 (26.5.2025)
- European Chemicals Agency, ECHA 2022. Committee for Risk Assessment, RAC, Opinion on scientific evaluation of occupational exposure limits for cobalt and inorganic cobalt compounds, ECHA/RAC/OEL-O-0000007197-68-01/F, 1 December 2022. Saatavilla:

https://echa.europa.eu/documents/10162/7937606/final_rac_oel_opinion_cobalt_en.pdf/d96755b2-8bd0-afe7-ab94-0a2f263fc593?t=1675065309296 (26.5.2025)

Graff P, Ståhlblom B, Nordenberg E, ym. 2016. Evaluating measuring techniques for occupational exposure during additive manufacturing of metals: A pilot study. *Journal of Industrial Ecology* 21(S1):120–129.

Heiden MJ, Deibler LA, Rodelas JM, ym. 2019. Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process. *Additive Manufacturing* 25:84–103.

Hubs. "Additive technologies compared. Metal 3D printing." 2022. Saatavilla: <https://www.hubs.com/guides/metal-3d-printing> (26.5.2025)

Hulo S, Chérot-Kornobis N, Howsam M, ym. 2014. Manganese in exhaled breath condensate: a new marker of exposure to welding fumes. *Toxicology Letters* 226(1):63–9.

Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, ym. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology* 7(2):60–72.

Jensen ACØ, Harboe H, Brostrøm A, ym. 2020. Nanoparticle exposure and workplace measurements during processes related to 3D printing of a metal object. *Frontiers in Public Health* 8:608718.

Kangas A, Kukko K, Kanerva T, Säämänen A, ym. (2023). Workplace exposure measurements of emission from industrial 3D printing. *Annals of Work Exposures and Health* 67(5): 596–608.

Karlsson HL, Vallabani NVS, Wang X, ym. 2023. Health hazards of particles in additive manufacturing: a cross-disciplinary study on reactivity, toxicity and occupational exposure to two nickel-based alloys. *Scientific Reports* 13, 20846.

Leese L, Jones K, Bocca B ym. 2023. HBM4EU chromates study – the measurement of hexavalent and trivalent chromium in exhaled breath condensate samples from occupationally exposed workers across Europe. *Toxicology Letters* 375: 59-68.

Leso V, Ercolano ML, Mazzotta I, ym. 2021. Threedimensional (3D) printing: Implications for risk assessment and management in occupational settings. *Annals of Work Exposures and Health* 65(6):617–634.

- Lewinski NA, Secondo LE & Ferri JK. 2019. On-site three-dimensional printer aerosol hazard assessment: Pilot study of a portable in vitro exposure cassette. *Process Safety and Climate Change* 38(3):e12030.
- Ljunggren SA, Karlsson H, Ståhlbom B, ym. 2019. Biomonitoring of metal exposure during additive manufacturing (3D printing). *Safety and Health at Work* 10(4):518–526.
- Ljunggren SA, Ward LJ, Graff P, ym. 2021. Metal additive manufacturing and possible clinical markers for the monitoring of exposure-related health effects. *PLoS ONE* 16(3):e0248601.
- Lu C, Zhang R, Xiao M, ym. 2022. A comprehensive characterization of virgin and recycled 316L powders during laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology* 18:2292–2309.
- Mechali A, Hlinka J, Kresta M, ym. 2024. Effect of powder recycling on the surface and selected technological properties of M300 maraging steel produced via the SLM method. *Journal of Manufacturing and Material Processing* 8(6):267.
- Oddone E, Perneti R, Fiorentino M, ym. 2022. Particle measurements of metal additive manufacturing to assess working occupational exposures: A comparative analysis of selective laser melting, laser metal deposition and hybrid laser metal deposition. *Industrial Health* 60:371–386.
- Perneti R, Galbusera F, Cattenone A, ym. (2023). Characterizing nanoparticle release patterns of laser powder bed fusion in metal additive manufacturing: First step towards mitigation measures. *Annals of Work Exposures and Health* 67(2):252–265.
- Piili H, Salminen A, Korpela M, ym. 2019. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto (LUT). "Katsaus metallien 3D-tulostukseen: Tutkimuksen lähtökohdat." Saatavilla: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159875/190815%20Katsaus%20metallien%203Dtulostukseen%20FVV.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (26.5.2025)
- Porras S, Ladeira C, Ribeiro E, ym. 2019. HBM4EU occupational biomonitoring study on hexavalent chromium and other harmful chemicals. Standard Operating Procedures (SOPs). WP8 - Targeted field work surveys and alignment at EU level. Saatavilla: <https://www.hbm4eu.eu/online-library/> (26.5.2025)
- Ronda N, Grzelak K, Polanski M & Dworecka-Wojcik J. 2022. The influence of layer thickness on the microstructure and mechanical properties of M300 maraging steel additively manufactured by LENS technology. *Materials*, 15, 603.

- Scheepers P, Scheepers PTJ, Duca RC, ym. 2021. HBM4EU Occupational Biomonitoring Study on e-Waste-Study Protocol. International Journal of Environmental Research and Public Health 18(24):12987.
- Sosiaali- ja terveysministeriö (STM) 2025. HTP-arvot 2025: Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö.
- Sousa M, Arezes P & Silva F. 2021. Occupational exposure to ultrafine particles in metal additive manufacturing: A qualitative and quantitative risk assessment. International Journal of Environmental Research and Public Health 18(18):9788.
- Tang JC, Luo JP, Huang YJ, ym. 2020. Immunological response triggered by metallic 3D printing powders. Additive Manufacturing 35:101392.
- Työterveyslaitos 2013. Teollisesti tuotettujen nanomateriaalien tavoitetasoperustelumuistio. Helsinki: Työterveyslaitos.
- Työterveyslaitos 2016. Hengittyvän ja alveolijakeisen pölyn tavoitetasoperustelumuistio. Helsinki: Työterveyslaitos.
- Työterveyslaitos 2023. Kemikaalialtistumisen biomonitorointi, Biomonitoroinnin viiterajat ja toimenpiderajat (päivitetty 25.9.2023). Saatavilla: <https://www.ttl.fi/kemikaalialtistumisen-biomonitorointi> (3.6.2025)
- US EPA. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/052F, 2011. Saatavilla: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=236252 (24.4.2025)
- Vafadar A, Guzzomi F, Rassau A & Hayward K. 2021. Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. Applied Sciences 11(3):1213.
- Vallabani NVS, Lijagic A, Persson A, ym. 2022. Toxicity evaluation of particles formed during 3Dprinting: Cytotoxic, genotoxic, and inflammatory response in lung and macrophage models. Toxicology 467:153100.
- Viegas S, Martins C, Bocca B, ym. 2022. HBM4EU Chromates Study: Determinants of Exposure to Hexavalent Chromium in Plating, Welding and Other Occupational Settings. International Journal of Environmental Research and Public Health 19(6): 3683.

Viitanen A-K, Uuksulainen S, Koivisto AJ, ym. 2017. Workplace measurements of ultrafine particles—A literature review. *Annals of Work Exposures and Health* 61(7):749–758.

Wright RO & Baccarelli A. 2007. Metals and neurotoxicology. *The Journal of Nutrition* 137(12):2809–2813.

Liitteet

Liite 1, 1(7)

Kysely 3D-tulostimien käyttäjille

Arvoisa työntekijä,

Tämä kysely liittyy Työsuojelurahaston rahoittamaan tutkimushankkeeseen "Altistuminen ja terveystriskit metallien 3D-tulostustöissä (META3D)".

Hankkeen toteuttavat Itä-Suomen yliopiston Sisäympäristön ja työhygienian tutkimusryhmä sekä Työterveyslaitos. Kysely perustuu vertaisarvioidussa tieteellisessä artikkelissa käytettyyn kyselyyn sekä aiemmissa biomonitorointitutkimuksissa käytettyihin kyselyihin.

Pyydän Sinua osallistumaan tutkimukseen ja täyttämään oheisen kyselylomakkeen. Kysely palautetaan tutkijoille työpaikallasi tehtävän näytteenkeräyksen yhteydessä. Tutkija käy vastaukset läpi kanssasi ja sinulla on mahdollisuus esittää kysymyksiä, mikäli jokin asia on jäänyt epäselväksi. Vastaukset käsitellään luottamuksellisesti ja vastausten käsittelyssä nimesi korvataan koodilla yksityisyytesi suojaamiseksi. Kiitos yhteistyöstä!

Kyselylomakkeen täyttöpäivämäärä _____

Etu- ja sukunimi _____

Biologinen sukupuoli _____

Syntymävuosi _____

Työpaikka _____

Työtehtävä _____

Tutkimuskoodi (tutkija täyttää) _____

Kotiosoite tai sähköpostiosoite (henkilökohtaisten tutkimustulosten toimittamiseksi)

Liite 1, 2(7)

Tutkimuskoodi _____

1. Työpaikka ja työtehtävät

1.1. Työpaikkasi kuvaus (valitse sopiva vaihtoehto)

- ☐ Kaupallinen yritys
- ☐ Korkeakoulu
- ☐ Tutkimuslaitos

1.2. Kuinka kauan olet työskennellyt nykyisessä työpaikassasi (vuotta)

- ☐ < 1
- ☐ 1–3
- ☐ 3–5
- ☐ > 5

1.3. Oletko työskennellyt aikaisemmin metallialalla (esim. jalostus, valmistus, työstö ja koneistus) tai metalli- tai sähkö ja elektroniikkaromun kierrätyksessä?

- ☐ En ole
- ☐ < 1 vuotta
- ☐ 1–3 vuotta
- ☐ 3–5 vuotta
- ☐ Yli 5 vuotta

Mikäli vastasit kyllä, tarkenna millaisia työtehtäviä olet aiemmin tehnyt:

1.4. Työvuorosi pituus nykyisessä työpaikassasi (tuntia/päivä) _____

1.5. 3D-tulostukseen käyttämäsi keskimääräinen aika viikossa

- ☐ < päivä viikossa
- ☐ 1–3 päivää viikossa
- ☐ > 3 päivää viikossa

1.6. Työnkuvaasi liittyvät tehtävät. Voit valita yhden tai useamman vaihtoehdon

- ☐ Tulostusmateriaalin lataus 3D-tulostimeen
- ☐ Tulostusmateriaalien käsittely käsin
- ☐ Lattioiden ja tasojen siivous
- ☐ Tulostettujen kappaleiden pinnoitus
- ☐ Tulostimien ylläpito
- ☐ 3D-tulostaminen
- ☐ 3D-mallintaminen
- ☐ Tulostettujen kappaleiden jälkikäsittely (hionta/kiillotus ym.)
- ☐ Tulostusmateriaalien ja raaka-aineiden hävitys/kierrätys
- ☐ Muu (mm. paperityöt, asiakaspalvelu, konsultointi) _____

Liite 1, 3(7)

Tutkimuskoodi _____

1.7. Ilmanvaihto 3D-tulostustiloissasi (voit valita yhden tai useamman vaihtoehdon)

- ☐ Painovoimainen (esim. avoin ikkuna)
- ☐ Mekaaninen (esim. tuuletin tai puhallin)
- ☐ Koneellinen
- ☐ Kohdepoisto

1.8. Henkilökohtaisten suojausten käyttö 3D-tulostustyössä (ruksaa käytössä olevat suojaimet ja tarkenna suojausten tiedot)

- ☐ Hengityksensuojain. Tarkenna suojausten tyyppi:

- ☐ Suojalasit

- ☐ Erilliset työvaatteet, tarkenna:

- ☐ Käsineet, tarkenna käsineen tyyppi:

- ☐ Muu, mikä: _____

- ☐ Ei suojausta käytössä

2. Koulutustausta

- ☐ Peruskoulu
- ☐ Ammattikoulu
- ☐ Lukio
- ☐ Alempi korkeakoulututkinto
- ☐ Ylempi korkeakoulututkinto

3. Metallialtistumiseen ja altistumisen varhaisiin vaikutuksiin vaikuttavat taustatiedot

3.1. Onko kotisi lähellä teollisuuslaitoksia tai polttolaitoksia

- ☐ Ei
- ☐ Kyllä, tarkenna kuinka kaukana (km) _____

3.2. Mikä on liikennetiheys kotisi ympäristössä

- ☐ Kävelykatu (hyvin vähäinen liikenne)
- ☐ Hiljainen katu (vähäinen liikenne)
- ☐ Asuinkatu (keskitiheä liikenne)
- ☐ Päätie (tiheä liikenne)
- ☐ Moottoritie (hyvin tiheä liikenne)

Liite 1, 4(7)

Tutkimuskoodi _____

3.3. Pesetkö kätesi työvuoron jälkeen tai sen aikana (ympyröi kaikki sopivat)

- ☐ Työvuoron jälkeen
- ☐ Työvuoron aikana ennen syömistä tai juomista
- ☐ Työvuoron aikana ennen tupakointia (jos poltat)
- ☐ Työvuoron aikana ennen WC:ssä käyntiä

3.4. Tupakoitko tai käytätkö muita tupakkatuotteita

- ☐ Kyllä tupakoin
- ☐ Käytän sähkösavukkeita
- ☐ Käytän nuuskaa
- ☐ Lopettanut 12 kk sitten tai aiemmin
- ☐ Ei koskaan tupakoinut / käyttänyt tupakkatuotteita

3.5. Jos tupakoit tai käytät sähkösavukkeita, tarkenna

Montako tupakkaa poltat päivässä _____ tai ml päivässä _____

Montako vuotta olet tupakoinut _____

3.6. Käytätkö alkoholia

- ☐ Kyllä päivittäin
- ☐ Kyllä viikoittain
- ☐ Kyllä kuukausittain
- ☐ Harvemmin kuin kuukausittain
- ☐ En lainkaan

3.7. Kuinka monta kertaa keskimäärin juot tyypillisenä päivänä seuraavia juomia

- ☐ Energiajuomat _____
- ☐ Kahvi _____
- ☐ Tee _____

3.8. Käytätkö ravintolisä

- ☐ En
- ☐ Kyllä, tarkenna mitä _____

3.9. Onko sinulla lääketieteellisiä implantteja, joissa on metallia

- ☐ Ei
- ☐ Kyllä, tarkenna _____

3.10. Onko sinulla hammaspaikkoja

- ☐ Ei
- ☐ Kyllä, tarkenna mitä materiaalia _____

Tutkimuskoodi _____

3.11. Onko sinulla vapaa-ajan harrastuksia, joihin voi liittyä altistumista metalleille (esim. hitsaus, metalli- tai elektroniikkatyöt, ruiskumaalaus, ammunta)

- ☐ Ei
- ☐ Kyllä, tarkenna mitä _____
Kuinka usein ja kuinka pitkiä aikoja _____

4. Oirekysely

4.1. Onko sinulla esiintynyt jotain seuraavista oireista vuoden aikana toistuvasti? Voit valita yhden tai useamman vaihtoehdon

4.1.1. Ylähengitystieoireilu

- ☐ Aivastelu
- ☐ Nenän/kurkun/silmien kutina
- ☐ Nenän tukkoisuus
- ☐ Vuotava nenä
- ☐ Ei oireita

	Sama	Lievempi	Voimakkaampi
Mikäli vastasit myöntävästi joihinkin yllä mainittuihin oireisiin, ovatko oireet samankaltaisia, lievempiä vai voimakkaampia vapaapäivinä?			
Kuinka pitkään sinulla on ollut näitä oireita?	Vuotta Kuukautta		

4.1.2. Alahengitystieoireilu

- ☐ Hengenahdistus
- ☐ Hengityksen vinkuminen
- ☐ Puristava rinta
- ☐ Yskä
- ☐ Ei oireita

	Sama	Lievempi	Voimakkaampi
Mikäli vastasit myöntävästi joihinkin yllä mainittuihin oireisiin, ovatko oireet samankaltaisia, lievempiä vai voimakkaampia vapaapäivinä?			
Kuinka pitkään sinulla on ollut näitä oireita?	Vuotta Kuukautta		

Tutkimuskoodi _____

4.1.3. Päänsärky

- ☐ Kyllä
☐ Ei

	Sama	Lievempi	Voimakkaampi
Mikäli vastasit myöntävästi joihinkin yllä mainittuihin oireisiin, ovatko oireet samankaltaisia, lievempiä vai voimakkaampia vapaapäivinä?			
Kuinka pitkään sinulla on ollut näitä oireita?	Vuotta Kuukautta		

4.1.4. Iho/silmä-oireet

- ☐ Kuiva/halkeileva iho käsissä
☐ Rakkulat, kutina, punoittava, turvonnut tai vuotava iho käsissä
☐ Silmien arkuutta, kirvelyä ja kutiamista, vetistystä, kuivumista tai punoittamista
☐ Ei oireita

	Sama	Lievempi	Voimakkaampi
Mikäli vastasit myöntävästi joihinkin yllä mainittuihin oireisiin, ovatko oireet samankaltaisia, lievempiä vai voimakkaampia vapaapäivinä?			
Kuinka pitkään sinulla on ollut näitä oireita?	Vuotta Kuukautta		

4.2. Onko sinulla esiintynyt jotain seuraavista oireista edellisten kahden viikon aikana?
Voit valita yhden tai useamman vaihtoehdon

4.2.1. Ylähengitystieoireilu

- ☐ Aivastelu
☐ Nenän/kurkun/silmien kutina
☐ Nenän tukkoisuus
☐ Vuotava nenä
☐ Ei oireita

4.2.2. Alahengitystieoireilu

- ☐ Hengenahdistus
☐ Hengityksen vinkuminen
☐ Puristava rinta
☐ Yskä
☐ Ei oireita

Tutkimuskoodi _____

4.3. Aikaisemmin diagnosoidut sairaudet

- ☐ Astma
- ☐ Allerginen nuha
- ☐ Atooppinen iho/ekseema
- ☐ Kosketusihottuma
- ☐ Nokkosihottuma
- ☐ Keuhkohtaumatauti
- ☐ Joku muu hengityselinsairaus, tarkenna:
- ☐ Keuhkokuume viimeisen 12 kk aikana
- ☐ Poskiontelotulehdus tai muu poski- tai otsaontelon sairaus viimeisen 12 kk aikana
- ☐ Sydänsairaus, tarkenna:
- ☐ Ei diagnosoitu

Jos sinulla on astma, vastaa seuraaviin kysymyksiin:

	Kyllä	Ei
Onko sinulla ollut astmakohtausta viimeisen 12 kk aikana?		
Käytätkö tällä hetkellä jotain astmalääkitystä (hengitettävä sumute tai jauhe tai pillerit)		
Käytätkö kohtauslääkettä?		
Mikäli käytät, kuinka usein olet joutunut ottamaan kohtauslääkkeen?		

5. Oletko ollut lääkäriin yhteydessä edellä mainitsemiesi toistuvien oireiden takia?

- ☐ Kyllä, tarkenna minkä oireiden takia ja milloin:

☐ Ei

Kiitos kun vastasit kyselyyn!

Metallien 3D-tulostus on yleistynyt viime vuosina. Tässä Työsuojelurahaston rahoittamassa tutkimushankkeessa tuotettiin uutta tietoa tulostustyöntekijöiden altistumisesta hiukkasille ja metalleille tulostustöiden eri vaiheissa. Työntekijöiden kokonaisaltistumista selvitettiin määrittämällä metallipitoisuuksia ilma-, ihopyyhintä- ja biologisissa näytteissä. Lisäksi tutkimuksessa saatiin tietoa varhaisista tulehdusvaikutuksista ja työntekijöiden kokemista oireista. Hankkeessa laadittiin malliratkaisu turvallisista työtavoista metallien 3D-tulostustöissä. Alan työpaikat voivat hyödyntää malliratkaisua toiminnassaan. Hankkeen tuottamalla tiedolla voidaan edistää alan työturvallisuutta ja riskienhallinnan kehittämistä.



Työsuojelurahasto
Arbetskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund

Työterveyslaitos
Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

PL 40, 00032 Työterveyslaitos

www.ttl.fi

ISBN 978-952-391-204-5 (PDF)

