

SUOMALAISTEN PIENHIUKKASALTISTUKSEN KEHITYS 1979–2021

Suomalaisten ilmansaasteiden altistustasojen ja jakaumien kattava arviointi alueellisesti ja ajallisesti tuli äskettäin mahdolliseksi, kun yhteispohjoismaisessa hankkeessa mallitettiin lähes 40 vuoden pitoisuusajaksarja kaikkiin Pohjoismaihin. Vertaamme tässä artikkelissa näitä altistusarvioita ja trendejä eurooppalaiseen ja globaaliin aineistoon, jotka kattavat osan tuosta jaksosta.



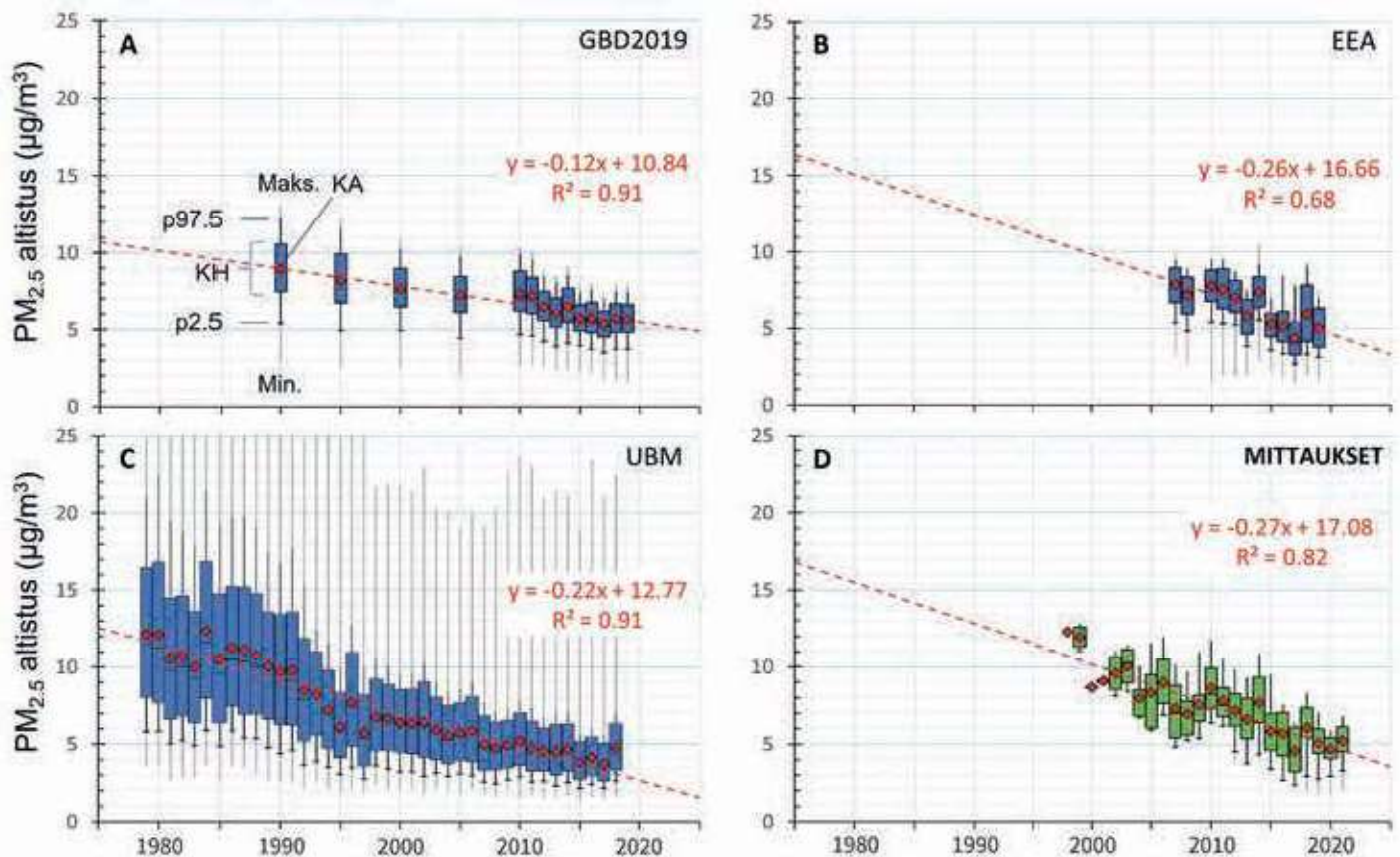
KUVA: CLAY BANKS / UNSPLASH

Otto Hänninen, johtava tutkija, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos
Antti Korhonen, tutkija, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Itä-Suomen yliopisto
Heli Lehtomäki, tutkija, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Itä-Suomen yliopisto
Marjut Roponen, professori, Itä-Suomen yliopisto
Isabell Rumrich, tutkija, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Itä-Suomen yliopisto

Ilmanasaasteiden ja erityisesti pienhiukkasten tiedetään aiheuttavan huomattavia terveyshaittoja. Kotimaisessa arvioissa pienhiukkasista aiheutuu Suomessa vuosittain noin 1600 ennenaikaista kuolemaa (Lehtomäki ym., 2018). Aikaisemmin olemme arvioineet APPEAL tutkimushankkeessa äitien raskaudenaikaisia hiukkasten ($PM_{2.5}$ ja PM_{10}), typpidioksidin ja otsonin altistustasoja vuosina 1987–2016 (Korhonen ym., 2022). Kyseisessä työssä havaitsimme, että pienhiukkasten altistustasot ovat laskeneet selvästi tuolla jaksolla. Myös mittauksen perusteella hiukkasten pitoisuudet ovat laskeneet

sillä jaksolla, jolta mittauksia on tehty (Anttila, 2020).

Maailman terveysjärjestö julkaisi syksyllä 2021 päivitetty ilmanlaadun ohjearvot (WHO, 2021). Pienhiukkasten osalta terveysperusteinen vuosiohjearvo $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puolittui arvoon $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ohjearvon päivitys perustuu lisääntyneeseen tieteelliseen näyttöön $PM_{2.5}$ terveysvaikutuksista alhaisillakin tasoilla. Euroopan komissio on reagoinut ohjearvon päivitykseen esittämällä $PM_{2.5}$ vuosiraja-arvon laskemista $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$:sta arvoon $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EC, 2022). Ilmanlaatudirektiivin päivitystä käsitellään tämän saman lehden rinnakkaisartikkelissa ja



Kuva 1 A-D. Pienhiukkasten altistusasteen hajontalukuineen (mediaani, keskihajonta, minimi, maksimi sekä 2,5 ja 97,5 persenttiilit). Altistumisen kehitystä kuvaamaan on käytetty lineaarista trendisovitetta.

siitä käy ilmi, että uudeksi vuosiraja-arvoksi kaavailtu $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ei ole ylittynyt yhdelläkään mittausasemalla vuonna 2021 (Kyllönen & Anttila, 2023).

Tässä työssä pienhiukkasten taustapitoisuudet ja tarkemmat paikallisen tason pitoisuudet on laskettu tanskalaisilla Danish Eulerian Hemispheric Model (DEHM) mallilla sekä Urban Background Model (UBM) mallilla $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ resoluutiolla (Brandt ym., 2012; Frohn ym., 2022). Euroopan ympäristökeskuksen (EEA) mallinnustulokset ovat saatavilla $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ resoluutiolla vuosille 2007–2013 (pl. 2009) ja $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ resoluutiolla vuosille 2014–2019 (Horálek ym., 2021). Global Burden of Disease (GBD2019) tutkimuksessa mallinnetut pienhiukkasten pitoisuudet ovat saatavilla viiden vuoden välein vuosien 1990–2005 välillä sekä vuosittain 2010–2019 välille.

Pitoisuudet arvioitiin $0,1 \times 0,1$ asteen resoluutiolla vastaten Suomen korkeudella karkeasti noin 10 km etelä-pohjois- ja 5 km itä-länsisuunnassa (IHME, 2021; Murray ym., 2020). Sekä EEA:n että GBD2019 mallit tukeutuvat mm. mittausten ja satelliittien ha-

vaintoihin ilmanlaatumallien lisäksi. Kaikki mallinnetut pitoisuudet yhdistettiin Tilastokeskuksen vuosien 2005 ja 2010–2019 väestöruudukkoihin $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ resoluutiolla väestöaltistusten ja jakaumien arvioimiseksi (Tilastokeskus, 2022). Väestönä käytettiin aina lähimmän saatavilla olevan vuoden väestömäärää. Tämän lisäksi pienhiukkaspitoisuuksien kehitystä arvioitiin käyttäen Suomen ilmanlaadun mittausten verkoston mittauksia vuosilta 1998–2021 (taulukko 1) (Ilmatieteenlaitos, 2023). Vuosikeskiarvot laskettiin käyttäen kaikkia asemia ja asematyyppejä, joissa mittausten ajallinen kattavuus oli vähintään 50 % vuodesta.

Tässä työssä kuvaamme suomalaisten pienhiukkasten altistusasteiden kehitystä sekä vaihtelua 40 vuoden jaksolla. Vertailemme eri mallien altistusestimaatteja toisiinsa sekä mittauksiin ja pohdimme tulosten pohjalta mitkä estimaateista kuvaavat parhaiten sitä tasoa, jolle olemme todellisuudessa altistuneet 2010-luvulla. Lisäksi arvioimme, kuinka suuri osuus on altistunut WHO:n uutta terveysperusteista pienhiukkasten vuosihjearvoa ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) korkeammille pitoisuuksille.

Menneiden vuosien kaltaista voimakasta lineaarista laskua absoluuttisella tasolla tuskin enää tulee, koska silloin lähestyttäisiin jo nollatasoa.

Taulukko 1. Väestön sekä pienhiukkasten pitoisuuksia mittaavien asemien määrä vuosittain.

Vuosi		-98	-99	-00	-01	-02	-03	-04	-05	-06	-07	-08	-09
Väestö	milj.	-	-	-	-	-	-	-	5,20	-	-	-	-
Asemia	N	1	2	2	2	4	6	7	7	7	10	15	23
Vuosi		-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21
Väestö	milj.	5,32	5,34	5,37	5,39	5,41	5,42	5,43	5,44	5,45	5,46	-	-
Asemia	N	25	28	30	31	33	37	34	33	37	37	42	50

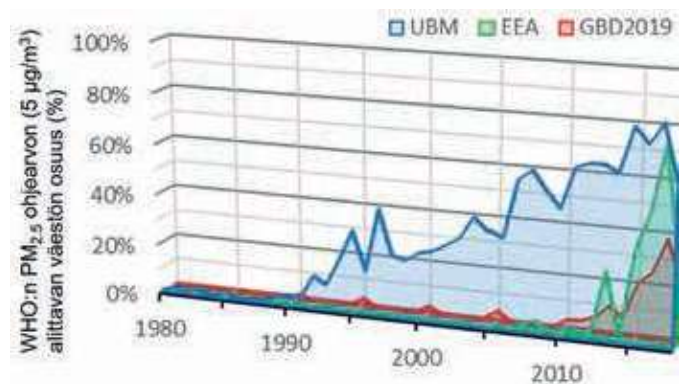
Altistustasot ovat laskeneet selvästi

Suomalaisten pienhiukkasten altistustasot ovat laske-
neet selvästi, kun verrataan 2010-luvun keskimääri-
siä altistuksia aiempiin tasoihin (kuva 1). Altistustasot
ovat UBM-mallilla arvioituna pudonneet alle puoleen
1980-luvun tasosta (11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sekä GBD2019-arvioissa
että -mittauksissa tasot ovat pudonneet noin kolman-
neksella vuoden 1990 ja 2000-luvun alun tasoista (n. 9
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Altistustasot ovat puolestaan laskeneet EEA:n
arvioissa noin 20 % vuosien 2007 ja 2008 altistustasosta
(n. 7,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Altistustasot olivat 2010-luvulla alhaisim-
mat UBM-mallilla laskettuna (ka. 4,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Mittaus-
ten keskiarvo (6,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) oli noin 5 % suurempi EEA:n
ja GBD2019-arvioihin verrattuna (6,1 ja 6,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ja
UBM-arvio oli näihin kolmeen muuhun arvioon ver-
rattuna 27–33 % alhaisempi.

Maksimiarvot, jotka sijoittuvat useimmiten sellu-
ja terästehtaiden tai satamien lähialueille, ovat olleet
UBM-mallilla arvioituna huomattavan korkeita (30—
56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) aina 1990-luvun puoleenväliin, minkä jälkeen
korkeimmat pitoisuudet ovat olleet puolta pienempiä,
jääden n. 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Muiden mallien korkeimmat pitoi-
suudet taas ovat olleet vielä tätäkin maltillisempia ja
jääneet vain reiluun 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tai jopa selvästi sen alle.
Alueellisen vaihtelun kuvaaminen jää siis näin ollen
UBM-malliin verrattuna pienemmäksi. Keskiarvoon
suhteutettu keskihajonta (variaatiokerroin) putosi
UBM-arvioissa tasolta 40 % alle 30 %:iin ja GBD2019-
arvioissa tasolta 20 % tasolle 16–18 % altistusaikasarjo-
jen alun ja lopun välillä. Variaatiokerroin EEA:n mal-
lin kohdalla kasvoi tasolta 15 % tasolle 25 %. Vuodesta
2005 eteenpäin mitattujen pitoisuuksien variaatioker-
toimessa (13–28 %) ei ollut näkyvissä selkeää muutosta.

Altistustasojen laskussa ei suuria eroja vuositasolla

Kuvataksemme trendejä sovitimme aikasarjoihin li-
neariset ja eksponentiaaliset sovitteet (taulukko 2).
Lineaarinen sovite mahdollistaa absoluuttisen keski-
määräisen vuosimuutoksen kuvaamisen. Eksponen-
tiaalinen sovite puolestaan kuvaa suhteellista vuosi-
muutosta. Selitysasteet kummassakin sovitteessa olivat
lähes samanlaiset, joten niiden perusteella ei voida
arvioida kumpi sovitteista kuvaa muutosta paremmin.
Malleista EEA:lla oli eniten muusta kuin trendistä joh-



Kuva 2. Väestön osuus (%) joka on altistunut WHO:n
pienhiukkasten vuosiohjearvoa (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021) pie-
nemmillä pitoisuuksille.

tuva vaihtelua selitysasteen jäädessä kummassakin
sovitteessa n. 15–25 % pienemmäksi muihin malleihin
verrattaessa. Trendisuoria katsottaessa eksponentiaa-
linen sovite antoi realistisemmän kuvan altistumisen
kehityksestä varsinkin loppupään loivenevan trendi-
viivan muodossa. Menneiden vuosien kaltaista voi-
makasta lineaarista laskua absoluuttisella tasolla tulee
tuskin enää tapahtumaan, koska silloin lähestyttäisiin
jo pian nollatasoa. Erityisesti mitattujen pitoisuuksi-
en ja EEA:n arvioiden lineaariset trendisuorat olivat
samankaltaisia. Ainoastaan sovitteen selitysaste oli
EEA:n kohdalla selkeästi pienempi (68 % vs. 82 %).

Lineaarisen sovitteen mukaan pienhiukkasten altis-
tustasot ovat laskeneet 0,22–0,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vuodessa EEA:n
ja UBM:n malleilla sekä mittauksen vuosipitoisuuksilla
laskettuna. GBD2019-ilmanlaatumallinnuksilla
laskettuna alenema (0,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) oli kolmeen muuhun
trendiarvioon verrattuna vain noin puolet, kun tarkastel-
tiin trendiä vuodesta 1990 alkaen. Tarkastellessa
vuosimuutosta pelkästään 2010-luvulla oli se lähes
linjassa muiden arvioiden kanssa (alenema 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
Eksponentiaalisen sovitteen mukaan UBM:n ja EEA:n
altistustasot sekä mittauksen pitoisuudet laskivat n. 3–4
% vuodessa, kun taas GBD2019-altistuksissa laskua oli
1,6 % vuodessa (2010-luvulla alenema 3,1 %).

Taulukko 2. Pienhiukkasten pitoisuuksien alenema vuositasolla lineaarisella ja eksponentiaalisella trendisovitteella arvioituna.

Aineisto	Aikaväli	"Vuosisia (N)	Lineaarinen		Eksponentiaalinen	
			Vuosimuutos (β_1) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	R2 (%)	Vuosimuutos(β_1) (%)	"R2 (%)"
UBM	1979-2018	40	-0,22	91%	-3,0%	93%
EEA	2007-2019	12	-0,26	68%	-4,1%	67%
GBD2019	1990-2019	14	-0,12	91%	-1,6%	89%
Mittaukset	1998-2021	24	-0,27	82%	-3,5%	83%

Ilmanlaadun ohjearvon päivittäminen kertoo siitä, että alhaistenkin altistustasojen terveysvaikutuksista on lisääntynyttä tieteellistä näyttöä.

WHO:n ohjearvon alittaneita asuinalueita yhä enemmän

Vertailtaessa suomalaisten altistustasoja terveysperusteisen WHO:n vuosiohjearvoon ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) näkyvissä tuloksissa parantuneen ilmanlaadun trendi (kuva 2). Optimistisin kuva ilmanlaadun kehityksestä saatiin UBM-mallilla. Arviolta noin puolet suomalaisista on asunut vuodesta 2007 lähtien alueilla, joissa ohjearvo on alittunut. Tätä ennen ilmanlaatu näyttäisi kehittyneen suotuisasti 1991–1997, minkä jälkeen altistustasot nousivat ja ohjearvoa alemmille pitoisuuksille altistuneen väestön määrä puolittui. Tästä eteenpäin pienhiukkasten altistustasot ovat taas laskeneet ja ohjearvoa alemmille pitoisuuksille altistuneen väestön määrä kasvanut huomattavasti noin 20 %:sta aina 80 %:iin. Sen sijaan GBD2019-mallin mukaan ohjearvon alittaneiden asuinalueiden väestön määrä on ollut erittäin pieni ennen vuotta 2015, korkeimmillaan 10 % vuonna 2013. Vuodesta 2015 alkaen vähintään 20 % ja korkeimmillaan 38 % väestöstä on asunut alueilla, joissa GBD2019-ohjearvo on alittunut. EEA:n mallin perusteella taas pienhiukkasten pitoisuudet ovat olleet asuinalueilla pääsääntöisesti ohjearvoa korkeampia ennen vuotta 2015. Tästä eteenpäin vähintään kolmannes ja korkeimmillaan melkein 75 % suomalaisista altistui ohjearvoa pienemmille pitoisuuksille.

Päätelmiä

Pienhiukkasten altistustasot ovat laskeneet tarkastelujaksoilla noin 20–60 % ja ovat olleet 2010-luvulla tasolla 4–6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kaikissa arvioissa altistustasojen lasku vuositasolla on ollut samaa suuruusluokkaa. Verrattaessa aikaisemmin arvioimaamme raskaana olleiden äitien keskimääräistä pienhiukkasaltistumista ($7,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tässä työssä lasketun koko väestön keskimääräiseen altistumiseen (UBM ka. $6,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oli se n. 8 % korkeampi vuosien 1987 ja 2016 välisenä

aikana. Ero 2010-luvulla oli lähes samansuuruinen (9 %). Vaikka WHO:n vuosiohjearvoa matalammille pitoisuuksille altistuneiden määrä on noussut huomattavasti 2010-luvun jälkimmäisellä puoliskolla, altistuu suuri osa väestöstä edelleen EEA:n ja GBD2019-altistuarvioiden mukaan ohjearvoa suuremmille pienhiukkaspitoisuuksille. Altistustrendien perusteella ohjearvoa alemmille pitoisuuksille altistuvan väestön osuus näyttäisi kuitenkin kasvavan tulevaisuudessa ilmanlaadun edelleen parantuessa, joskin vaihtelu voi olla suurta vuosien välillä.

Ilmatieteen laitoksen pienhiukkasten maaseututausta-asevilla vuosipitoisuudet 2010-luvulla ovat olleet pohjoisessa tasolla $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kitilän Matorova) ja etelässä lähes $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Virolahti ja Utö). Näiden asemien pitoisuuksiin vaikuttaa eniten kaukukulkeuma, kun taas kotimaisten päästölähteiden, kuten liikenteen ja puun pienpolton, vaikutukset jäävät vähäiseksi. Suuri osa väestöstä asuu kuitenkin tiheimmin asutuilla kaupunkialueilla, joilla lähipäästöt kohottavat pitoisuuksia. Tähän peilaten EEA:n, GBD2019-tutkimuksen ja Suomen ilmanlaadun mittausverkoston mittausten pitoisuuksilla laskettujen tasojen voitaneen ajatella olevan oikeansuuntaisia, koska ne ovat korkeampia kuin maaseututaustataso Etelä-Suomessa 2010-luvulla. Vastaavasti UBM:n mallinnuksiin perustuvilla arvioilla altistustasomme olisi alittanut Etelä-Suomen maaseututaustatason jo viime vuosikymmenellä.

Kiitokset:

Työssä on käytetty Aarhusin yliopiston mallittamia pitoisuuksia pienhiukkasille. Nordforskin (NordicWelfare) lisäksi työtä Suomessa on rahoittanut Suomen Akatemian (APPEAL) ja yhteispohjoismaiseen hankkeeseen osallistuneet kotimaiset tutkimuslaitokset THL, SYKE ja FMI.

Lähteet:

Anttila, P. (2020). *Air quality trends in Finland, 1994–2018*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-336-102-7>

Brandt, J., Silver, J. D., Frohn, L. M., Geels, C., Gross, A., Hansen, A. B., . . . Christensen, J. H. (2012). An integrated model study for Europe and North America using the Danish eulerian hemispheric model with focus on intercontinental transport of air pollution. *Atmospheric Environment*, 53, 156-176. doi://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.011

EC. (2022). European Commission. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast). [url:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A542%3AFIN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A542%3AFIN)

Frohn, L. M., Geels, C., Andersen, C., Andersson, C., Bennet, C., Christensen, J. H., . . . Brandt, J. (2022). Evaluation of multidecadal high-resolution atmospheric chemistry-transport modeling for exposure assessments in the continental Nordic countries. *Atmospheric Environment*, 290, 119334. doi:10.1016/j.atmosenv.2022.119334

Horálek, J., Vlasakova, L., Schreiberova, M., Markova, J., Schneider, P., Kurfürst, P., . . . Vlcek, O. (2021). ETC/ATNI report 1/2021: European air quality maps for 2019. PM10, PM2.5, ozone, NO2 and NOx spatial estimates and their uncertainties. [url:https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-1-2021-european-air-quality-maps-for-2019-pm10-pm2-5-ozone-no2-and-nox-spatial-estimates-and-their-uncertainties](https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-1-2021-european-air-quality-maps-for-2019-pm10-pm2-5-ozone-no2-and-nox-spatial-estimates-and-their-uncertainties)

IHME. (2021). Institute for Health Metrics and Evaluation. *Global Burden of Disease Collaborative Network. Global Burden of*

Disease Study 2019 (GBD 2019). Air Pollution Exposure Estimates 1990–2019. Seattle, United States of America: doi:https://doi.org/10.6069/70JS-NC54

Ilmatieteenlaitos. (2023). *Ilmanlaatu suomessa*. [url:https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmanlaatu](https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmanlaatu)

Korhonen, A., Rumrich, I., Roponen, M., & Hänninen, O. (2022). Raskaudenaikainen altistuminen ilmaan saasteille. *Ilmansuojelu-Lehti* 11/2022, s. 10-13. [url:https://isy.fi/wp-content/uploads/2022/05/IS_1_2022_NETTI-1.pdf](https://isy.fi/wp-content/uploads/2022/05/IS_1_2022_NETTI-1.pdf)

Kyllönen, K., & Anttila, P. (2023). EU:n ilmanlaatudirektiivien uudistus – mitä uutta suomelle. *Ilmansuojelu-lehti*, 1/2023

Lehtomäki, H., Korhonen, A., Asikainen, A., Karvosenoja, N., Kupiainen, K., Paunu, V., . . . Hänninen, O. (2018). Health impacts of ambient air pollution in Finland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4) doi:10.3390/ijerph15040736

Murray, C. J. L., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi-Kangevari, M., . . . Lim, S. S. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the global burden of disease study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223-1249. doi:10.1016/S0140-6736(20)30752-2

Tilastokeskus. (2022). Väestöruutuaineisto 1 km x 1 km. [url:https://www.stat.fi/org/avoindata/paikkatietoaineistot/vaestoruutuaineisto_1km.html](https://www.stat.fi/org/avoindata/paikkatietoaineistot/vaestoruutuaineisto_1km.html)

WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization. [url:https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329](https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329)



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

ILMANLAADUN JA UUSIUTUVAN ENERGIAN ASiantuntija

- Päästöjen leviämismalliselvitykset
- Ilmanlaadun mittaukset
- Mittalaitteiden kalibrointipalvelut
- Ilmakemian analyysipalvelut
- Ilmanlaadun seurantasuunnitelmat
- Ilmanlaadun koulutus- ja konsultointipalvelut
- Tuulimittaukset
- Tuuli- ja jäätämistälastulosten analysointi
- Paikallisen tuulivoimapotentiaalin määrittäminen
- Tuulivoiman tuuliennusteet
- Aurinkoenergian tuotantopotentiaali ja ennusteet
- Kansainväliset hankkeet ja tutkimushankkeet

WWW.ILMATIETEENLAITOS.FI/ILMANLAATUPALVELUT
ILMANLAATUPALVELUT@FMI.FI



Kuva: Laura Karlin