

Pienhiukkasten vaikutus terveyteen



*Tuloksia ja päätelmiä teknologiaohjelmasta
FINE Pienhiukkaset – Teknologia, ympäristö ja terveys*



Tekes



Raimo O. Salonen ja Arto Pennanen

Toimittanut Timo Paukku

Pienhiukkasten vaikutus terveyteen

Tuloksia ja päätelmiä teknologiaohjelmasta
FINE Pienhiukkaset – Teknologia, ympäristö ja terveys

Tämä julkaisu kuuluu sarjaan, joka esittelee FINE-teknologiaohjelman tuloksia eri osa-alueilta: energiantuotanto ja teollisuus, liikenne, mittaaminen, sisäilma sekä terveysvaikutukset.

Yhteystiedot: Raimo O. Salonen ja Arto Pennanen, Kansanterveyslaitos (KTL), www.ktl.fi, etunimi.sukunimi@ktl.fi

Taitto: Quickmac Oy

Kirjapaino: Libris Oy, Helsinki

ISBN 952-457-250-8

Copyright Tekes 2006. Kaikki oikeudet pidätetään.

Tämä julkaisu sisältää tekijänoikeudella suojattua aineistoa, jonka tekijänoikeus kuuluu Tekesille tai kolmansille osapuolille. Aineistoa ei saa käyttää kaupallisiin tarkoituksiin. Julkaisun sisältö on tekijöiden näkemys, eikä edusta Tekesin virallista kantaa. Tekes ei vastaa mistään aineiston käytön mahdollisesti aiheuttamista vahingoista. Lainattaessa on lähde mainittava.



Esipuhe

Yhdyskuntien ilma on puhdistunut paljon viime vuosikymmeninä. Teknisillä innovaatioilla on kehityksessä keskeinen rooli. Kaukolämpöjärjestelmien tulo 1950-luvulta alkaen vähensi puun ja hiilen pienpolttoa ja toi sinitaivaan esiin talvikaudella.

Myöhempinä vuosikymmeninä energia- ja teollisuuslaitokset vähensivät tehokkaasti rikkidioksidipäästöjä. Uudet tekniikat pienensivät myös hiukkaspäästöjä. Liikenteen hiukkaspäästöjen vähennyksessä on edetty ripeästi 1990-luvulta lähtien.

Parannuksista huolimatta yhdyskuntailman pienhiukkasia pidetään länsimaissa haitallisimpina ympäristötekijöinä ihmisen terveydelle. Haittojen kansanterveydellinen ja taloudellinen mittavuus hätkähdyttää ja saattaa jopa epäilyttää.

Toisaalta ihmiset tuntevat hyväksyvän selityksen siitä, että pienempikin vuosikymmeniä jatkuva altistuminen riittää kasvattamaan sairauskuormaa. Tupakansavun haitat ulottuvat miltei kaikkiin ihmisen elintoimintoihin, keuhkoista verenkiertoon ja aivoihin. Itse ei tarvitse edes polttaa. Passiivinen tupakansavulle altistuminen riittää.

Pienhiukkasia oli menneinä vuosikymmeninä elinympäristössämme paljon enemmän kuin nyt. Savupirteisessä elämässä oli kymmeniä vuosia lyhyempi kuin nykyisin. Savuhaitoista kärsivien kohtalo oli varmaankin muiden heikkojen tavoin varhainen kuolema – jos ei muuten, niin ainakin kulkutautien myötä. Itse asiassa tällaisen pienhiukkasille altistumisen haitallisuudesta on saatu tuoretta tutkimuksellista näyttöä kehitysmaista.

Polttoperäisten pienhiukkasten haitoista saatiin Suomessa kouriintuntuvaa näyttöä elokuussa 2006. Pietarin ympäristössä ja Venäjän Karjalassa metsäpalot olivat jatkuneet lähes kuukauden. Tuulet toivat pääkaupunkiseudulle ja etelärannikolle moneen otteeseen väkeviä savuja. Terveidenkin ihmisten silmät vuotivat, kurkkua kirveli ja henki tuntui salpautuvan reippaasti kävellessä. Sairaalat kertoivat lisääntyneistä astma-kohtauksista. Ihmisiä kehoitettiin pysymään savuiseen aikaan sisällä ja välttämään rasiitusta.

Ilmansuojelusta vastaavat viranomaiset kertoivat ennätysmäisen korkeista pienhiukkasten pitoisuuksista. Tunnin mittausjaksolla mitatut korkeimmat pitoisuudet olivat 10-20 -kertaisia verrattuna keskimääräiseen vuositason.

Helsinkiä on pidetty Euroopan puhtaimpana pääkaupunkina. Monina päivinä ilmanlaatu oli elokuussa 2006 maanosamme huonoimpien kaupunkien tasoa. Pahimpina tunteina näkyvyyksikin oli voimakkaasti rajoittunut. Silloin oltiin jo kehitysmaiden jättikaupunkien ilmanlaa-



duun tasolla. Ilma haisi pahalta eikä edes sulkeutuminen sisätiloihin enää suojannut haitoilta.

Suuren yleisön ja päättäjien luottamus tutkimustietoon ja sen pohjalta tehtyihin kansainvälisiin arvioiteihin vahvistui kesän aikana. Suomalainen monitieteinen hiukkastutkimus tuli monelle tutummaksi tiedotusvälineistä.

Viimeksi ilman pienhiukkasia on tutkittu perusteellisesti Tekesin Pienhiukkasten teknologiaohjelmassa, FINEssä. Sen toteuttivat sadat suomalaiset ja heidän kanssaan työskennelleet ulkomaiset tutkijat yhteensä 53 tutkimushankkeessa.

Ohjelman aihealueita olivat: Energiantuotannon ja teollisuuden päästöt, liikennevälineiden ja liikenteen päästöt, päästöjen mittaaminen ja mittalaitteet, sisäilman laatu sekä terveys- ja ympäristökysymykset. Tekesin lisäksi Suomen Akatemia, Liikenne- ja viestintäministeriö, Ympäristöministeriö ja yritykset rahoittivat ohjelman projekteja vuosina 2002–2005.

Ohjelma tuotti uutta tietoa ja myös kehitti alalle menetelmiä ja laitteita. Niiden avulla voi vähentää pienhiukkasten päästöjä ja hillitä niiden haitallisia vaikutuksia ihmiseen, ilmastoon ja muuhun ympäristöön. Tämä auttaa suomalaista yhteiskuntaa ja elinkeinoelämää varautumaan Euroopan unionin kiristyvään pienhiukkasten sääntelyyn. Uuden tiedon ja lisääntyvän sääntelyn odotetaan myös lisäävän liiketoimintaa.

Tämä kirjanen on yksi osa FINE-ohjelman loppuraportointia. Sen tarkoituksena on tarjota yleistajuista tietoa siitä, miten yhdyskuntailman hiukkasmaisille saasteille voi altistua ja miten ne vaikuttavat terveyteen. Kirjanen on suunnattu poliittisille päättäjille, virkamiehille, tutkimusrahoittajille, yritysjohdolle, tiedotusvälineille, muiden alojen tutkijoille ja suurelle yleisölle. Kiitämme sekä tutkijoita että kirjoittajia, joiden hyvä yhteistyö on mahdollistanut tämän julkaisun aikaansaamisen.



	Esipuhe	3
1	Johdanto	5
2	Hiukkasille altistuminen ja terveysvaikutukset	7
	Päästöt ja niiden leviäminen	8
	Yhdyskuntailman hiukkaset	10
	Henkilökohtainen altistuminen ja annos keuhkoihin	11
	Terveyteen vaikuttavat biologiset mekanismit	13
	Vaikutukset väestön terveyteen	14
3	Lainsäädäntöä kehitetään terveyden suojelemiseksi	17
	Kansalliset ohjeavot	17
	EU:n ilmansuojelun direktiivit	18
	Ehdotus EU:n uudeksi ilmansuojelun strategiaksi	19
4	Ohjelmasta uutta tietoa	23
	Terveystutkimus FINEssä	23
	Suomalainen tutkimus on kansainvälistä	26
5	Tulevaisuus	28
	Tietoa puuttuu	28
	Tietämys terveysvaikutuksista tuo uusia tekniikoita	29
	Kirjallisuutta	30
	Lyhenteitä ja määritelmiä	32



Ilmansaasteiden vaikutuksia terveyteen on tutkittu pitkään. Tutkimus on vaikuttanut jo vuosikymmeniä siihen, mitä ilmansuojelun alalla on päätetty sekä Euroopassa että Yhdysvalloissa. Tutkimuksen aktiivisuus ja kohteet ovat vaihdelleet eri vuosikymmeninä aikansa käsitysten mukaan. Eri altisteita on pidetty tärkeinä epäpuhtauksina.

Vielä 1950- ja 1960-luvuilla tutkijat uskoivat, että vakavat haitat liittyivät siihen, että hiililämmitys oli yleistä. Kylmä sää ja heikot tuulet kohottivat korkeiksi hiililämmityksestä tulevia rikkidioksidin ja noen pitoisuuksia. Parhaiten tutkitut esimerkit ovat Lontoosta. Brittiparlamentti rajoitti hiilen pienpolttota kaupungeissa 1956. Tutkijat arvelivat, että se poistaisi lontoolaisten oireilun ja vähentäisi kuolleisuutta.

Myöhemmin 1980-luvun alussa tutkijat olettivat, että he tunsivat epäpuhtauksiin liittyvät terveydelliset haitat jo varsin hyvin. He päättelivät, että rikkidioksidin ja typhen oksidien päästöjä pitäisi vähentää. Myös maanpäällisen otsonin pitoisuuksia pitäisi alentaa. Vähennysten arveltiin poistavan loput terveyteen vaikuttavat haitat. Noen päästöjen arvioitiin pienenevän riittävästi tällä tapaa.

1990-luvun alkaessa tutkijat ottivat käyttöön uusia menetelmiä. Ne osoittivat, että on yhteys kuolleisuuden ja sen välillä, mitä yhdyskuntailman hiukkasia ihmiset hengittivät päivittäin ja miten paljon. Yhteys löytyi selvästi matalammista pitoisuuksista kuin tutkimukset olivat aiemmin osoittaneet. Näiden hiukkasten läpimitta on alle kymmenen millimetrin tuhannesosaa.

Harvardin yliopisto Yhdysvalloissa julkisti vuonna 1993 ns. kuuden kaupungin tutkimuksen. Se osoitti, että pitkäksi ajaksi kohonneet hiukkasten pitoisuudet lyhensivät merkittävästi elinikää. Pienhiukkasten vaikutus arvioitiin pahemmaksi kuin isompien hengitettävien hiukkasten.

Maailman terveysjärjestön WHO:n asiantuntijat päätyivät vuonna 1994 rohkeaan toteamukseen. Sen mukaan yhdyskuntien ulkoilman matalatkin pitoisuudet lisäävät länsimaissa huomattavasti hengitys- ja sydänsairaiden kuolleisuutta. Niille altistuneet ihmiset tarvitsevat lisää hoitoja sairaaloissa. Heidän kykynsä toimia arjessa heikkenee. Lääkkeiden käyttö lisääntyy. Mitään turvallista hiukkasten pitoisuuden alarajaa ei pystytty määrittämään.

2000-luvulla on päädytty siihen, että yhdyskuntien ilman nykyiset hiukkasmaiset saasteet aiheuttavat länsimaissa eniten terveydellisiä haittoja, jotka johtuvat ympäristöstä. Tästä on saatu lisää näyttöjä sekä Pohjois-Amerikassa että Euroopassa. Jatkuva pienikin altistuminen pienhiukkasille näyttää pahentavan sydämen, verenkiertoelimistön ja hengityselinten sairauksia. Myös näiden sairauksien määrä saattaa lisääntyä. Lopputulos on se, että ihmisten kyky toimia heikkenee ja elinikä lyhenee varsin merkittävästi.

Lisäksi on havaittu, että karkeatkaan hengitettävät hiukkaset, joiden halkaisija on 2,5-10 millimetrin tuhannesosaa, eivät ole haitattomia. Ne voivat pahentaa ainakin hengityssairauksia, kuten astmaa ja keuhkohtaumaa. Vähemmän kehittyneissä maissa yhdyskuntailman

Alle 10 mikrometrin (μm) eli millimetrin tuhannesosan kokoisia hiukkasia kutsutaan **hengitettäviksi hiukkasiksi**. Suurimpia hengitettäviä hiukkasia sanotaan karkeiksi (halkaisija 2,5–10 μm) ja niitä pienempiä **pienhiukkasiksi** (halkaisija alle 2,5 μm) tai ultrapieniksi hiukkasiksi (halkaisija alle 0,1 μm). Ilmassa leijuvien hiukkasten massapitoisuuteen viitataan PM-lyhenteellä, alaindeksinä hiukkasten kokoluokka (PM_{10} , $\text{PM}_{10-2,5}$, $\text{PM}_{2,5}$). Ultrapienien hiukkasten määrää mitataan useimmiten ns. lukumääräpitoisuutena.

Yhdyskuntailman pienhiukkasille herkkiä väestöryhmiä ovat kaikenikäiset astmaatitot sekä ihmiset, jotka sairastavat keuhkohtaumaa eli ns. tupakkakeuhkosairautta, sepelvaltimotautia ja sydämen vajaatoimintaa. Näitä vakavia sairauksia potee arviolta 15 prosenttia maamme väestöstä. Myös allergista nuhaa sairastavat ja pienet lapset voivat saada tavanomaista herkemmin hengityselinten oireita ja infektioita pienhiukkasille altistumisen seurauksena.



Lehtikuva/Marja Väätäinen

hiukkasten pitoisuudet ovat yleensä paljon korkeampia kuin teollistuneissa länsimaissa. Teollistuvissa maissa on myös muita isoja ympäristöongelmia, jotka kaikki vaikuttavat väestön terveyteen.

Suomessa orasti jo 1980-luvulla väestötutkimus, joka selvitti yhdyskuntien ilmansaasteiden yhteyttä terveyteen. Parissakymmenessä vuodessa suomalainen ilmansaasteiden terveystutkimus on laajentunut ja monipuolistunut. Se kattaa kaikki nykyaikaisen hiukkastutkimuksen osa-alueet. Siihen kuuluvat väestön altistumisen ja terveyden tutkimus, terveyshaittoja selvittävä toksikologinen tutkimus ja riskien erittely.

Suomalaiset tutkijat ovat osallistuneet lukuisiin EU:n rahoittamiin hankkeisiin kaikilla hiukkastutkimuksen

osa-alueilla ja myös johtaneet joitakin niistä. Suomi on tuonut hankkeisiin tutkittavaksi Euroopan alhaisimpia pitoisuuksia. Lisäksi suomalaiset ovat tuoneet mukaan ns. pohjoisen ulottuvuuden ja pohjoisen väestölliset ja ilmastolliset tekijät.

Tutkimuksen tarjoama tietämys on kuitenkin vielä puutteellista. Tutkijat eivät tunne vielä kunnolla hiukkasten lähteiden ja kemiallisten koostumusten vaikutuksia terveyteen. Näiden tiedollisten aukkojen täyttämistä olisi paljon hyötyä, kun EU:n ilmansuojeluun liittyvä lainsäädäntö kehittyy. Samalla alueellinen ja paikallinen ilmansuojelu edistyisivät. Tutkimus auttaisi myös kehittämään tekniikoita, jotka vähentävät päästöjä ja ihmisten altistumista haitallisille hiukkasille.

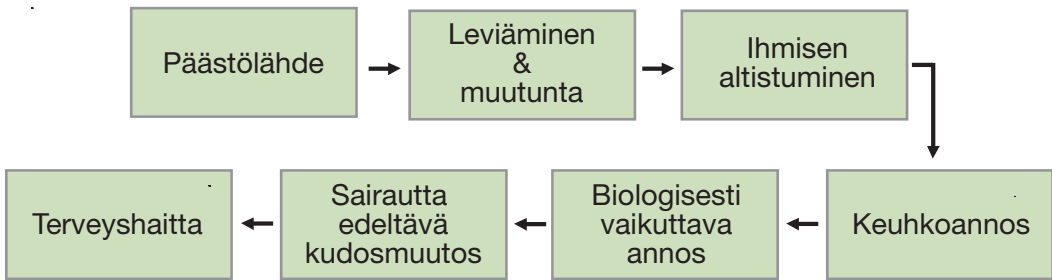


2 Hiukkasille altistuminen ja terveysvaikutukset

Yhdyskuntailman hiukkasmaiset saasteet muodostavat alailmakehään monimutkaisen seoksen. Se vaihtelee suuresti eri paikoissa ja eri aikoina. Seoksen hiukkasten kokoon ja jakaumaan sekä kemialliseen koostumukseen vaikuttavat paikalliset päästöt, ns. primaarihiukkaset.

Myös ilmakehän hiukkasten toissijaisella muodostumisella, muuntumisella ja kulkeutumisella on tärkeä

merkitys. Ihmisen altistumiseen ja keuhkoihin jäävään annokseen vaikuttaa mm. se, miten hiukkaset siirtyvät ulkotiloista sisätiloihin. Heti ilmaantuviin tai myöhempiin terveydellisiin haittoihin vaikuttavat puolestaan oma perimä ja sairaudet sekä elinympäristön muut tekijät ja elämäntavat (kuva 1).



Kuva 1. Yhdyskuntailman epäpuhtauksien vaikutusten ketju terveyteen.

Yhdyskuntailman hiukkasten vaikutukset terveyteen muodostavat laajan kirjon. Ne ulottuvat hyvin lievästä, ohimenevästä oireista aina pysyvään sairastumiseen ja kuolemaan. Vaikutusten jakautumista väestöön voi kuvata pyramidilla. Siinä kannan leveys kuvaa suhteellista osuutta hiukkasille altistuneesta väestöstä. Lieviä vaikutuksia kokee satunnaisesti suuri määrä ihmisiä. Vakavia haittoja saavien määrä on pienempi (kuva 2).

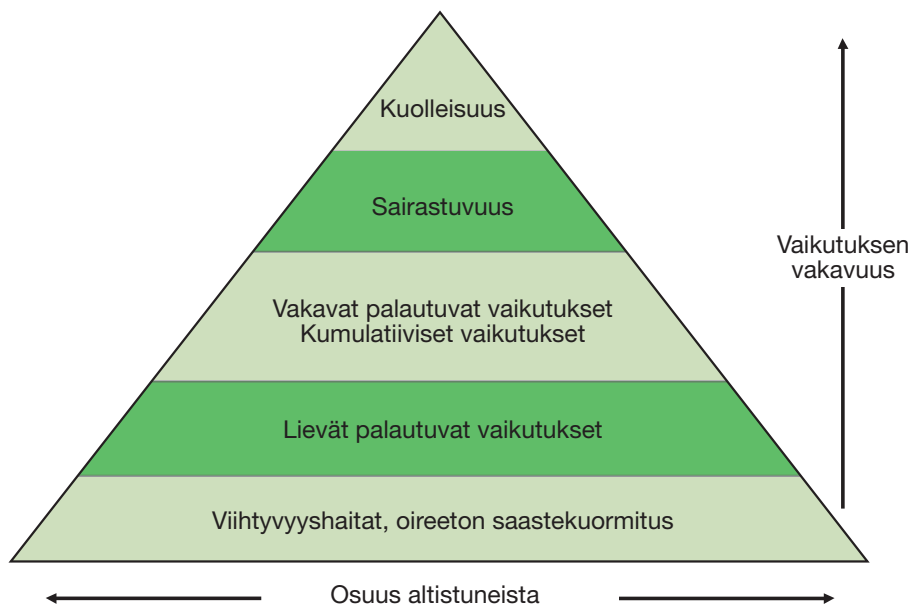
Suomessa aiheutuu todennäköisesti eniten terveydellisiä haittoja pitkäaikaisesta altistumisesta liikenteen ja puun pienpolton pienhiukkasille. Haitallisimpia ovat epätäydellisestä palamisesta syntyvät hiukkaset. Merkittäviä lyhytaikaisia altistumisia ja haittoja aiheutuu myös metsä-, maasto- ja kulotussavujen kaukokulkeutumisista. Liikenteen tuottama keväinen katupöly altistaa huomattavan paljon lyhytaikaisesti karkeille hengitettävälle hiukkasille. Sen seurauksena syntyy suuri määrä lieviä terveydellisiä haittoja. Ihminen voi aistia vain lyhytaikaiset rajut ilmanlaadun heikentymiset.

Ennenaikainen kuolema on tietenkin kaikkein vakavin terveydellinen haitta. Useimmiten kuoleman aiheuttaa pitkään jatkunut altistuminen pienhiukkasille. Pitkäai-

kainen sairaus, esimerkiksi sepelvaltimotauti, keuhkoastma, astma tai keuhkosityöpä alkaa vähitellen. Se pahenee hiukkasten vaikutuksesta tavallista nopeammin. Tällaiset puhkeavat sairaudet ja niiden pahentumiset vaikuttavat paljon kansanterveyteen ja rasittavat kansantaloutta. Ne lisäävät terveydenhuollon tutkimuksia ja hoitoja. Myös poissaolot töistä lisääntyvät.

Hiukkasten haitalliset vaikutukset ja niistä palautuminen on yksilöllistä. Terve ihminen ei ehkä edes huomaa, kun nenää ja kurkkua ärsyttää tai keuhkoputkien ilmavirtaus alenee lievästi. Sama altistuminen hiukkasille voi viedä astmaatikon sairaalaan.

Jos huono ilmanlaatu ulottuu kotiin tai työpaikan sisätiloihin, se voi aiheuttaa herkissä henkilöissä toistuvia epämiellyttäviä hajuaistimuksia ja lieviä oireita. Päästä särkee ja hengityselimistö ärsyyntyy. Oireet heikentävät työtehoa ja lisäävät poissaoloja töistä. Myös terveydenhuollon palvelujen käyttö lisääntyy. Vaikka tällaiset vaivat ovat lieviä eivätkä pysyviä, niiden merkitys kansantaloudelle voi olla suuri. Ei ole yksiselitteistä vastausta siihen missä kulkee raja siinä, milloin ihmisen kyky toimia vaikeutuu.



Kuva 2. Kaavio yhdyskuntailman hiukkasten vaikutuksista terveyteen.

Päästöt ja niiden leviäminen

Ulkoilman kiinteät ja nestemäiset hiukkaset ovat peräisin monista lähteistä läheltä ja kaukaa. Ne on tuottanut

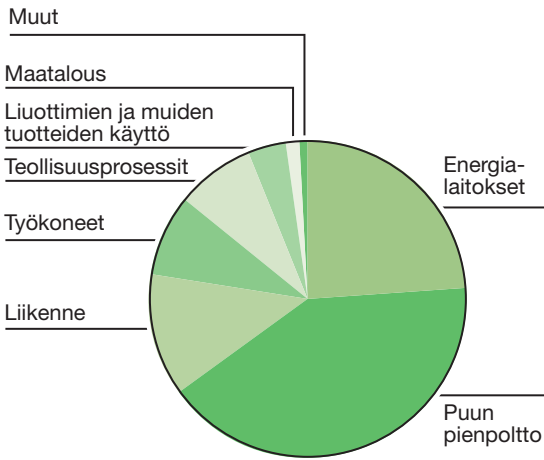
ihminen tai luonto itse. Pienhiukkasten ja karkeiden hengitettävien hiukkasten lähteet ja kemiallinen koostumus poikkeavat toisistaan selvästi.

Hiukkasten koko	Ihmissen toiminnasta syntyvät hiukkaset	Luonnossa syntyvät hiukkaset
Karkeat hengitettävät hiukkaset (2,5-10 µm)	Liikenteen jarru-, rengas- ja nastapöly, asfalttipöly Hiekoitushiekan ja tiesuolan pöly Maansiirtöpöly Teollisuuden, energiantuotannon, satamien jne. materiaalikäsitteily	Tuulen kuljettama hiekkapöly Merisuola Kasvijäänteet, siitepölyosaset Homeitiöt, maaperän bakteerikomponentit (esim. endotoksiini)
Pienhiukkaset (< 2,5 µm)	Pienpolton ja liikenteen pakokaasujen nokipäästöt Energialaitosten lentotuhka Teollisuusprosessien suorat hiukkaspäästöt Monien lähteiden kaasumaisista hiilivedyistä muodostuvat orgaaniset hiukkaset, rikkidioksidista ja typenoksideista muodostuvat epäorgaaniset hiukkaset	Metsä- ja maastopalojen ja tulivuoren purkausten nokipäästöt ja kaasupäästöistä muodostuvat orgaaniset ja epäorgaaniset hiukkaset Puiden ja muun kasvillisuuden hiilivetyistä muodostuvat orgaaniset hiukkaset

Taulukko 1. Ihmisen ja luonnon ilmakehään tuottamat hiukkaset.

Suomen ympäristökeskus on arvioinut, että maamme ensisijaiset pienhiukkasten päästöt olivat noin 38 000 tonnia vuonna 2004. Kotitalouksien puun pienpolto oli selvästi suurin lähde. Sen osuus oli 41 prosenttia. Suuri osuus johtuu arviolta 3,7 miljoonasta tulisijasta, jotka käyttävät puuta. Niitä ovat lämmityskattilat, takat, uunit, liedet, kiukaat ja vesipadat. Puun pienpolton osuus kaikista päästöistä pienenee jonkin verran, kun päästöjen kertoimet päivitetään uuden tiedon mukaisiksi.

Omakotitalot polttavat noin puolet kaikesta puusta. Loput poltetaan maataloilla ja loma-asunnoilla. Puun pienpolto on toistaiseksi vähennetty vain vähän hiukkaspäästöjä, mutta jatkossa niitäkin tullaan säätelemään ainakin kansallisesti. Muita suuria pienhiukkasten päästöjen lähteitä ovat energialaitokset 24, kotimaan tieliikenne 13, teollisuus 8, työkonet 8 sekä liuottimien ja muiden tuotteiden käyttö 4 prosenttia.



Kuva 3. Suomen ensisijaiset pienhiukkasten päästöjen lähteet 2004. Puun pienpoltton osuus on uusilla pienemmällä päästökertoimilla laskettuna noin 25 prosenttia (Suomen ympäristökeskus 2006).

Ihmisen toiminta aiheuttaa paljon karkeitä hengitettäviä hiukkasia. Näiden päästöjen arviointi on selvästi vaikeampaa kuin pienhiukkasten päästöjen.

Liikenne tuottaa jarru- ja rengaspölyä. Renkaiden alle jäävä hiekoitushiekka kuluttaa asfalttia. Näistä lähteistä syntyy pääasiassa karkeitä hengitettäviä hiukkasia. Niiden päästöt ovat suurimmat kaupunkiympäristöissä. Nämä päästöt on arvioitu monta kertaa suuremmiksi kuin ajoneuvojen pakokaasupäästöt.

Monet muut paikalliset lähteet tuottavat karkeitä hengitettäviä hiukkasia. Niitä syntyy materiaalien käsittelyssä ja maansiirroissa teollisuuslaitoksissa ja energiaa tuottavissa laitoksissa ja satamissa sekä rakennus- ja louhintatöissä. Näitä hiukkasia syntyy paikallisesti myös luonnossa.

Eri polttolähteistä tulee ilmakehään hyvin samankokoisia primaarihiukkasia. Valtaosa niistä on alle 0,1 µm:n suuruisia ns. ultrapieniä hiukkasia. Niitä tulee esimerkiksi puun pienpoltosta, autojen moottoreista ja energialaitosten kattiloista. Niiden kemiallinen koostumus voi kuitenkin vaihdella suuresti. Se johtuu siitä, että polttoaineen koostumuksessa on eroja, samoin palamisen tehokkuudessa ja savukaasujen jälkipuhdistuksessa.

Puuta käyttävä pientulisija päästää ilmaan suhteellisen paljon nokea ja orgaanisia yhdisteitä. Tämä johtuu siitä, että puu palaa epätäydellisesti. Myös savukaasujen jälkipuhdistus puuttuu. Tuloksena on muun muassa syöpää aiheuttavia polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä eli PAH-yhdisteitä.

Dieselmoottorit aiheuttavat enemmän päästöjä kuin perinteiset bensiinimoottorit. Dieselmoottoreista syntyy tyypillisesti vähemmän orgaanisten yhdisteiden päästöjä kuin nokea. Nämäkin voi nykyisin suodattaa. Keskisuuri tai suuri hiiltä tai biopolttoainetta käyttävä energialaitos

ei enää päästä piipustaan mainittavia määriä nokea tai orgaanisia yhdisteitä. Se johtuu hyvin hallitusta palamisesta. Myös savukaasujen jälkipuhdistus on hoidettu tehokkaasti. Primaarihiukkasten päästöt ovat suurelta osin epäorgaanisia kivennäissuoloja.

Ilmakehään tulleista kaasumaaisista epäpuhtauksista syntyy monin tavoin sekundaarihiukkasia. Palamisesta syntyneet orgaaniset ja epäorgaaniset yhdisteet muuntuvat nopeasti, kun ne jäähtyvät tullessaan ilmakehään.

Monet höyrystyneet hiilivedyt tiivistyvät nestemäisiksi hiukkasiksi tai kiinnittyvät hiukkasten pinnalle. Ne voivat koaguloitua eli yhdistyä keskenään tai nokihiukkasten kanssa, ja muuntuvat johdannaisyhdisteiksi. Muutoksen saavat aikaan auringonvalo ja reaktiiviset kaasut, kuten happiradikaalit, otsoni ja typen oksidit.

Myös epäorgaaniset hapot tiivistyvät hiukkasten pinnalle. Pisarat kasvavat, kun ilmakehän vesi tiivistyy niihin. Kaasujen muuntuminen on pilvissä hidasta. Kaasut ovat yleensä syntyneet palamisessa. Kestää tunteja tai vuorokausia, kun typen ja rikin oksidit ja ammoniakki muuntuvat epäorgaanisiksi hiukkasiksi. Ilmakehän reaktioiden nopeuksissa on suuria maantieteellisiä eroja. Ne voivat vaihdella myös samassa paikassa eri vuorokauden- ja vuodenaikoina.

Leviämistä kuvaavat mallit tutkivat hiukkasten kulkeutumista ja laimentumista ilmakehässä. Ne voidaan jakaa paikallisiin, alueellisiin ja kaukokulkeumaa kuvaaviin malleihin.

Paikalliset mallit arvioivat saasteiden pitoisuuksia päästölähteen lähellä, kuten liikenteen ja energiantuotannon tai teollisuuslaitoksen lähiympäristössä. Alueellisen mittakaavan mallien päämäärä on usein arvioida esimerkiksi happamoittavien ja rehevöittävien yhdisteiden pitoisuuksia ja laskeumaa. Alueellisen mittakaavan malleilla arvioidaan myös pienhiukkasten, siitepölyjen ja raskasmetallien leviämistä.

Leviämismalleihin liittyy useimmiten osuus, joka kuvaa kemialla ja hiukkasten vaiheita ilmakehässä. Niiden avulla voidaan arvioida kaasujen ja hiukkasten muuntumista, kemiallisia reaktioita ja ilmakehästä poistumista laskeumien muodossa.

Ilmatieteen laitos käyttää kolmea alueellisen tason mallia ja lukuisia paikallisen mittakaavan malleja. Mallien tuottamaa tietoa voi käyttää ilmansuojelun suunnittelussa. Sen avulla voi paikantaa eri lähteitä. Malleilla voi selvittää päästöjen tärkeyttä ja saasteiden pitoisuuksia ja arvioida väestön altistumista. Niillä voi myös vertailla, miten eri tavoin toteutettu päästöjen vähentäminen vaikuttaa ennen pitkää.

Malleja voi hyödyntää myös mittaussasemien sijoittelussa. Ne auttavat selvittämään, miten väestöä kannattaisi varoittaa, jos ilmanlaatu huononee huolestuttavasti. Mallien toimivuus varmistetaan vertaamalla niiden tuloksia mitattuun ilmanlaatuun. Ilmanlaadun mallien kehittäminen ja käyttö ovat lisääntyneet paljon viime vuosina.

Mallin kuvaus	Tyyppi	Lyhenne
Maanosan mittakaavan leviämisen- ja laskeumamalli	Alueellinen	HILATAR
Radioaktiivisten aineiden, hiukkasten, siitepölyjen leviämisen- ja ennustemalli	Alueellinen	SILAM
Valokemia- ja otsonimallit	Alueellinen	FMI-PTM
Kaupunki-mittakaavan ilmanlaatumalli	Paikallinen	UDM-FMI
Katukuilumalli	Paikallinen	OSPM
Tieliikenteen päästöjen leviämisen- ja muutuntamallit	Paikallinen	CAR-FMI
Ilmanlaadun ennustemalli	Paikallinen	API-FMI

Taulukko 2. Ilmatieteen laitoksen käyttämiä ilmanlaatumalleja.

Yhdyskuntailman hiukkaset

Yhdyskuntailmassa leijuvat hiukkaset on jaettu kolmeen neljään kokoluokkaan (kuva 4). Kahdessa pienimmässä luokassa on lähipoltosta äskettäin päässeitä nokihiukkasia (EC), rikkihappoa (H_2SO_4) ja kaasumaisista hiilivedyistä muodostuneita orgaanisia yhdisteitä (OC).

Nämä pääasiassa alle 0,1 millimetrin tuhannesosan kokoiset ultrapienet hiukkaset syntyvät esimerkiksi pienitulisijassa. Ne voivat syntyä myös vanhassa dieselmootorissa, jos polttoaine palaa epätäydellisesti. Näiden hiukkasten massapitoisuus on pieni eli alle kymmenen prosenttia PM_{10} :stä. Niitä on kuitenkin lukumääräisesti hyvin paljon eli yli 90 prosenttia halkaisijaltaan alle kymmenen mikrometrin hiukkasista.

Ultrapienien hiukkasten ikä ilmakehässä on lämpimällä säällä vain minuutteja, mutta talvipakkasella jopa tunteja. Nämä hiukkaset kasvavat nopeasti 0,1-1 μm :n

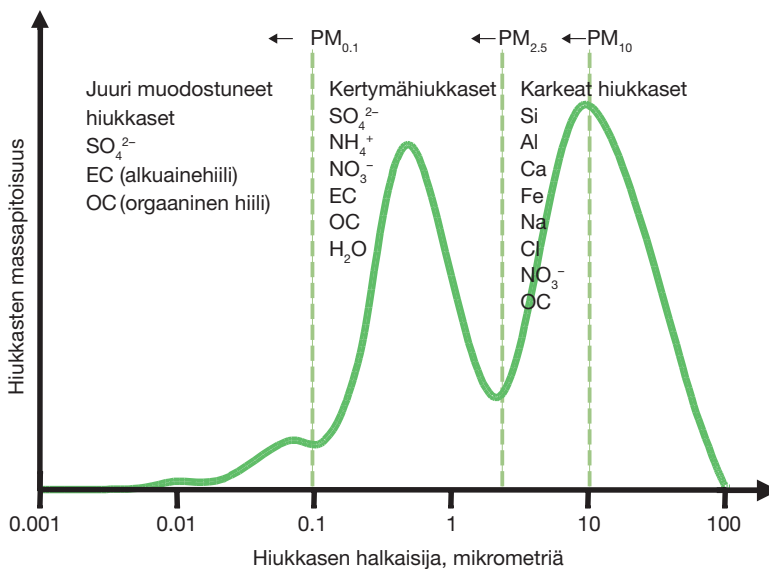
kokoiseksi kertymähiukkasiksi. Ne koaguloituvat toistensa ja isompien hiukkasten kanssa. Ne myös tiivistävät itseensä ilmassa olevaa vettä. Nestemäisiä ultrapieniä hiukkasia muodostuu myös luonnossa. Ne tulevat orgaanisista kaasusta, joita havupuut tuottavat.

Suuri osa kertymähiukkasista on muodostunut pilvisä vuorokausien aikana. Nämä alueellisen ja kaukokulkeuman hiukkaset sisältävät vesiliukoisia, sekundaarisia epäorgaanisia ja orgaanisia yhdisteitä. Ne muodostuvat satojen tai tuhansien kilometrien pituisen kulkeutumisen aikana. Mukana on kuitenkin myös nokea, joka on peräisin kaukaisista polttolähteistä. Kertymähiukkaset poistuvat ilmakehästä kuivana laskeumana tai sateen mukana.

Yhdyskuntailman karkeat hengitettävät hiukkaset ovat suurelta osin peräisin ihmisen tuottamista lähipäästöistä (taulukko 1). Niillä on suurempi massa kuin kertymähiukkasilla, ja niiden ikä ilmakehässä on useimmiten vain minuutteja tai tunteja. Suuri osa karkeista hiukkasista on maaperän kiviainesta, joka ei liukene. Ne poistuvat ilmakehästä kuivalaskeumana. Sen aiheuttaa Maan painovoima.

Tuuli voi poikkeuksellisissa oloissa kuljettaa pitkiäkin matkoja luonnosta tulevia karkeita hiukkasia. Esimerkiksi Saharan hiekkamyrskyistä kulkeutuu joskus huomattavia määriä karkeita hiukkasia Etelä- ja Keski-Eurooppaan. Myös siitepölyhiukkaset voivat kulkeutua pitkiä matkoja.

Hiukkaset, jotka ovat halkaisijaltaan 1-2,5 millimetrin tuhannesosaa, ovat pääasiassa kookkaita kertymähiukkasia. Niitä tuo esimerkiksi kaukokulkeuma, kun ilmakehässä vallitsee korkea ilman kosteus. Joskus niissä on puolestaan maaperän kiviainesta, kuivalla säällä esimerkiksi katupölyä.



Kuva 4. Yhdyskuntailman hiukkasten massapitoisuuden tyypillinen jakauma ja kolmen hiukaskokoluokan ($PM_{0.1}$, $PM_{2.5-0.1}$, $PM_{10-2.5}$) tärkeimmät kemialliset osatekijät

Haitallisten terveysvaikutusten tutkimus hyödyntää kolmen kokoluokan pitoisuuksien mittausta. Halkaisijaltaan alle 0,1 millimetrin tuhannesosan kokoisia ultrapieniä hiukkasia mitataan tavallisesti lukumääränä kuutiokeskimetriä kohti. Pienhiukkasia, halkaisija alle 2,5 millimetrin tuhannesosaa, ja karkeita hengitettäviä hiukkasia, halkaisija 2,5-10 millimetrin tuhannesosaa, mitataan puolestaan massapitoisuuksina, mikrogrammaa kuutiometriä kohti. Massapitoisuus merkitään lyhenteiden PM_{10} , $PM_{2.5}$ ja $PM_{10-2.5}$ jälkeen.

Pienhiukkasiin kuuluvat sekä ultrapienet hiukkaset että kertymähiukkaset. Karkeat hengitettävät hiukkaset muodostavat vain osan kaikista ilmakehässä leijuvista karkeista hiukkasista.

Viranomaiset mittaavat useimmiten kaikkien alle 10 millimetrin tuhannesosaa halkaisijaltaan olevien hengitettävien hiukkasten massapitoisuutta (PM_{10}). Se sisältää $PM_{2.5:n}$ ja $PM_{10-2.5:n}$. Tämä suure antaa vähän mahdollisuutta erotella, miten eri päästölähteet vaikuttavat ilmanlaatuun. Eri maiden ilmansuojelun laeissa on annettu määräyksiä ulkoilman PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -pitoisuuksista. Yhdysvaltojen ympäristövirasto on hiljattain ehdottanut myös $PM_{10-2.5:n}$ sääntelyä.

Vähintään puolet Suomen pääkaupunkiseudun $PM_{2.5}$ -pitoisuudesta koostuu alueellisen ja kaukokulkeuman mukana tulleista epäorgaanisista ja orgaanisista hiukkasista. Niistä suuri osa koostuu vesiliukoisista epäorgaanisista yhdisteistä. Ne ovat muodostuneet kulkeutumisen aikana kaasuisista.

Muita merkittäviä lähteitä ovat paikallisen liikenteen pakokaasut ja satamien laivojen öljyn poltto. Ne molemmat kohottavat erityisesti polton lähellä ultrapienien hiukkasten pitoisuutta. Myös puun pienpolto ja hieman myös katupöly kohottavat pääkaupunkiseudun $PM_{2.5}$ -pitoisuuksia. $PM_{10-2.5}$ -hiukkaset ovat pääosin peräisin liikenteen nostattamasta katupölystä. Pakkasilta ja rajun kaukokulkeuman aikana jopa 85 prosenttia PM_{10} :stä voi olla alle 2,5 $\mu m:n$ kokoisia pienhiukkasia. Keväisen katupölyjakson aikana yhtä suuri osuus PM_{10} :stä voi olla 2,5-10 $\mu m:n$ kokoisia karkeita hengitettäviä hiukkasia.

Henkilökohtainen altistuminen ja annos keuhkoihin

Yhdyskuntailman epäpuhtauksien pitoisuudet vaihtelevat vuorokauden eri aikoina ja säänkin mukaan. Kaupunkiliikenne esimerkiksi noudattaa hyvin samana toistuvaa rytmiä joka vuorokausi.

Ulkoilman hiukkasten pitoisuudet ovat yhteydessä väestön terveyteen. Se aiheuttaa usein ihmetystä. Useimmat ihmiset kun viettävät ulkona alle kymmenen prosenttia vuorokautisesta ajastaan. Jopa 80-90 prosenttia vietetään eri sisätiloissa, kuten kodissa, työpaikalla, koulussa ja päiväkodissa.

Nämä ovat ns. mikroympäristöjä. Kansanterveyslaitoksessa on yli kymmenen vuoden ajan tutkittu pienhiukkasille ja ultrapienille hiukkasille altistumista

mikroympäristöissä eri väestöryhmissä. Kohteina ovat olleet esimerkiksi koululaiset, työssä käyvät ja ikääntyneet sydänsairaat.

Tutkimusta on tehty mikroympäristöihin sijoitettujen $PM_{2.5}$ -keräinten avulla. Lisäksi tutkimusryhmän henkilöt ovat kantaneet mukanaan mittareita, jotka ovat koko ajan päällä. Henkilöt ovat pitäneet tekemisistään päiväkirjaa. Niiden avulla on voitu eritellä, miten eri tekijät vaikuttavat henkilön altistumiseen. Tiedon avulla on voitu kehittää ennustavia malleja siitä, miten altistumme pienhiukkasille, ja keinoja, miten vähentää altistumista.



Kuva 5. Ihmisen altistumisen mittauksessa käytetty mittaussalkku Kansanterveyslaitoksen ULTRA-tutkimuksessa Helsingissä. Tutkimukseen osallistuneet henkilöt kuljettivat salkkua mukanaan.

Pääkaupunkiseudulla ihmiset viettävät noin tunnin vuorokaudessa liikennevälineissä ja liikenneväylien lähellä. Se on miltei sama aika kuin muussa ulkoilussa. Päästölähteet ovat lähellä, koska päästökorkeus on maanpinnan lähellä. Sen vuoksi henkilö altistuu silloin moninkertaisesti eri kokoisille hiukkasille, jos niitä vertaa keskimääräiseen kaupunki-ilmaan. Tämä koskee niin pakokaasujen ultrapieniä hiukkasia ja pieniä hiukkasia, kuin myös jarru-, rengas-, asfaltti- ja hiekkapölystä tulevia kookkaampia hiukkasia.

Sama matala päästökorkeus voimistaa altistumista myös muualla. Pientalojen puulämmityksen savu, teollisuuden hajapäästöt sekä pienten energialaitosten ja kaupunkisatamien laivojen puhdistamattomat piippujen päästöt ovat sellaisia. Niitä on tutkittu paljon vähemmän kuin liikenteen aiheuttamaa altistumista.

Hiukkasten kokoluokka	Hiukkasten liukoisuus	Vaiheet elimistössä
Karkeat hengitettävät hiukkaset (2,5-10 µm)	Paljon liukenemattomia mineraaleja ja orgaanista ainesta	Kulkeutuvat isompiin värekarvallisiin keuhkoputkiin Poistuvat tuntien tai vuorokausien kuluessa
Pienhiukkaset (< 2,5 µm)	Suuri osa hyvin vesiliukoisia epäorgaanisia suoloja Pieni osa rasvaliukoisia orgaanisia yhdisteitä (PAH ym.) Pieni osa liukenematonta nokea, orgaanista ainesta ja mineraaleja	Kulkeutuvat pieniin värekarvattomiin keuhkoputkiin ja keuhkorakkuloihin Kiinteät hiukkaset poistuvat niistä kuukausien, joskus vasta vuosien kuluessa Kuljetuksen tekevät hiukkasten kuljetukseen erikoistuneet valkosolut (makrofagit)
Ultrapienet hiukkaset (< 0,1 µm)	Liukoisuus vaihtelee riippuen lähipäästölähteistä ja päästöjen kemiallisesta koostumuksesta (noki, hiilivedyt, rikkihappo)	Kulkeutuvat keuhkorakkuloihin ja niistä osittain verenkiertoon Suuri lukumäärä Makrofagit eivät tunnista ultrapieniä hiukkasia, mutta hengitysteitä verhoavat epiteelisolut ottavat niitä sisäänsä

Taulukko 3. Ihmisen tuottamiin yhdyskuntailman hiukkasiin liitettyjä ominaisuuksia.

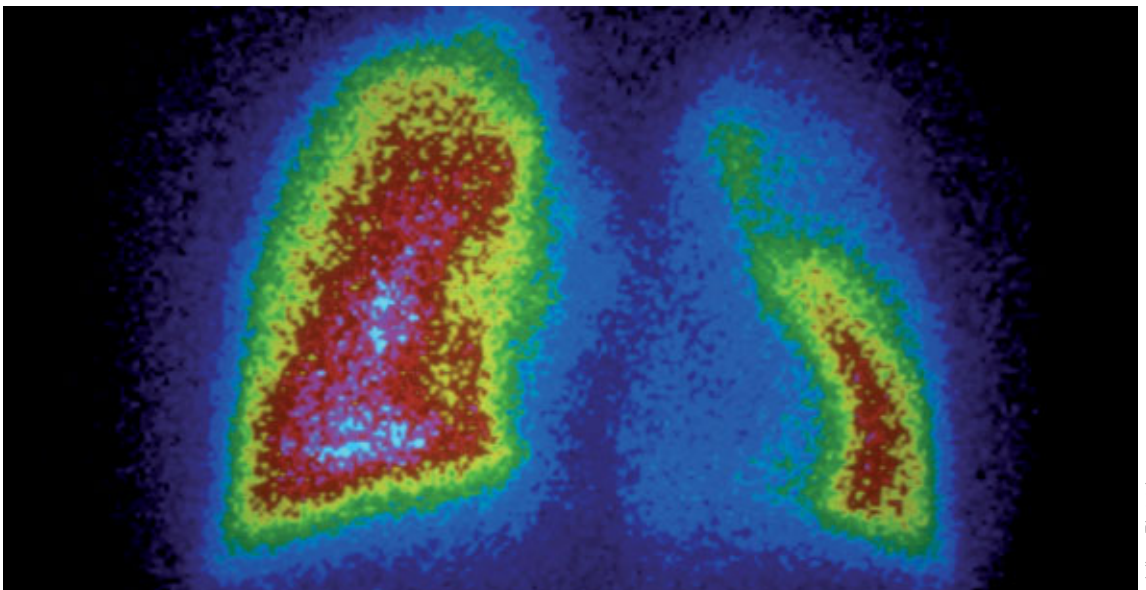
Yhdyskuntailman pienhiukkaset ja ultrapienet hiukkaset kulkeutuvat hyvin rakennusten sisäilmaan, jos ilmanvaihto perustuu painovoimaan. Niin käy myös, jos koneellista ottoilmaa ei suodateta tehokkaasti. Sen sijaan karkeat hengitettävät hiukkaset kulkeutuvat ilmanvaihdon kautta huonosti sisäilmaan.

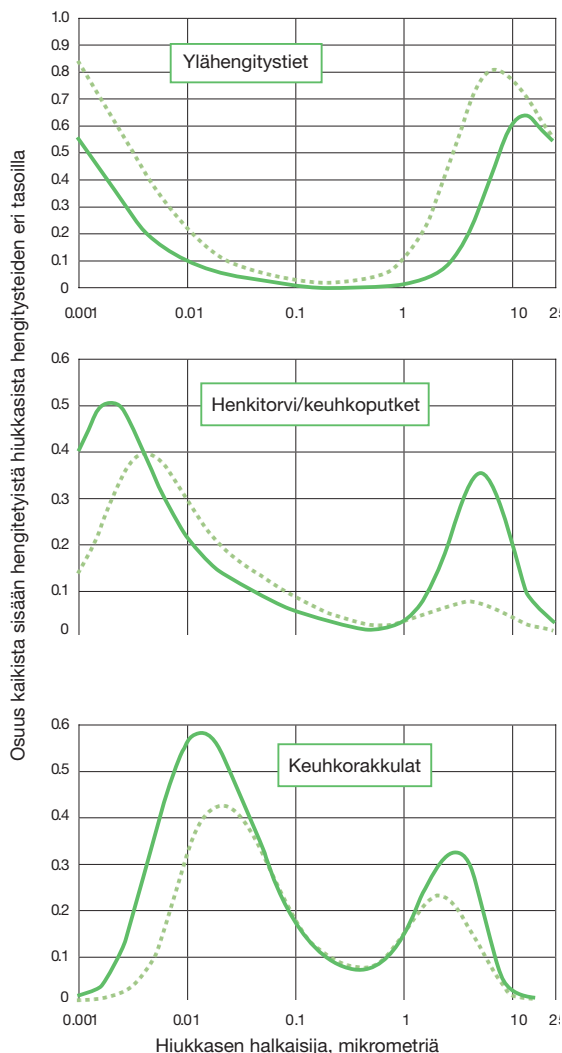
EU7-luokan ja sitä paremmat suodattimet vähentävät kaiken kokoisten hiukkasten pääsyä sisäilmaan. Ne alentavat huomattavasti sisäilmaan tunkeutuvien pienhiukkasten ja ultrapienien hiukkasten pitoisuuksia. Myös huoneisiin asennettavat ilmanpuhdistimet auttavat.

Ihmisen sisään hengittämän ilman hiukkaset jakautuvat kokonsa mukaan hengitysteiden eri osiin (kuva 6). Lepohengitys kulkee nenän kautta. Ylähengitysteihin jää valtaosa kaikkein pienimmistä, 0,001-0,01 µm:n kokoisista ultrapienistä hiukkasista.

Noin puolet suuremmista 0,01-0,1 µm:n kokoisista ultrapienistä hiukkasista kulkeutuu alahengitysteihin eli keuhkoputkiin ja keuhkorakkuloihin.

Vain noin kymmenen prosenttia 0,1-1 µm:n kokoisista kertymähiukkasista jää lepo hengityksessä alahengitysteihin. Valtaosa niistä ei enää laskeutua hengitystien pinnalle ennen uloshengitystä. Noin 30 prosenttia suuremmista, 1-2,5 µm:n kokoisista pienhiukkasista jää lepo hengityksessä keuhkoputkiin ja keuhkorakkuloihin. Karkeista hengitettävistä, 2,5-10 µm:n kokoisista hiukkasista jää niihin vain 10-15 prosenttia. Tämä johtuu siitä, että noin 70 prosenttia näistä hiukkasista jää ylähengitysteihin. Kaiken kokoisista hiukkasista osa kulkeutuu uloshengitysilman mukana poishengitysteistä (kuva 6).





Kuva 6. Sisäänhengitetyn ilman hiukkasten jakauma niiden halkaisijan mukaan. Lepohengitys on merkitty katkoviivalla, suuhengitys yhtenäisellä viivalla (USEPA 2004).

Fyysinen rasitus voimistaa hengitystä suun kautta. Se lisää kaiken kokoisten ultrapienten hiukkasten jäämistä keuhkoputkiin ja keuhkorakkuloihin. Myös 1-10 μm :n kokoisten pienhiukkasten ja karkeiden hengitettävien hiukkasten jääminen lisääntyy. Sen sijaan suuhengitys ei lisää kertymähiukkasia alahengitysteihin.

Kiinteät ultrapienet hiukkaset voivat kulkeutua keuhkorakkuloista verenkiertoon ja muihin elimiin, kuten sydämeen. Onpa niiden ehdotettu voivan kulkeutua aivoihin. Ne kulkisivat sinne nenän hajuepiteeliltä lähteviä hermoja pitkin.

Pienhiukkaset poistuvat hitaasti pienistä keuhkoputkista ja keuhkorakkuloista. Se kohottaa annoksia kudoksissa helpommin, kuin jos hiukkaset ovat suurempia. Karkeat hengitettävät hiukkaset kulkeutuvat suurelta osin isompiin värekarvalliisiin keuhkoputkiin.

Sieltä ne poistuvat nieluun kiinnittyneinä yskösklimaani. Kuljetuksen hoitavat epiteelisoluja verhoavat värekarvat. Nielusta ne jatkavat nieltynä vatsalaukkuihin.

Pitkään kestävät hengityssairaudet, esimerkiksi astma ja keuhkohtaumatauti, muuttavat hengitysteiden rakennetta ja värekarvojen kuljetusta. Näin ollen eri kokoisten hiukkasten jakauma keuhkoissa on sairaassa henkilössä erilainen kuin terveessä. Hiukkasten poistuminen keuhkoista voi hidastua sairauden vuoksi.

Terveysteen vaikuttavat biologiset mekanismit

Eläimiin ja soluihin tehdyt altistukset auttavat selittämään, miten yhdyskuntailman ja päästölähteiden hiukkaset vaikuttavat. Yleisesti ottaen hiukkasten päästölähteiden ja kemiallisten koostumusten vaikutukset elimiin ja kudoksiin tunnetaan huonosti.

Tutkimukset etsivät väestötutkimusten tuloksille biologista selitystä. Ne voivat myös varmistaa väestötutkimusten havaintoja siitä, mitkä hiukkaslähteet ja kemialliset koostumukset ovat haitallisimpia. Tarkoin suunniteltu ja valvottu koe poistaa sekoittavat tekijät ja varmistaa altistumisen ja vaikutuksen syy- ja seuraussuhteita.

Kokeissa hiukkasille altistetaan yleensä kahdella menetelmällä. Ihmisen tai eläimen hengitystiet voi altistaa suoraan hiukkasille, jotka on otettu silloisesta yhdyskuntailmasta. Sama voidaan tehdä viljellyille makrofageille ja hengitysteiden pinnan soluille.

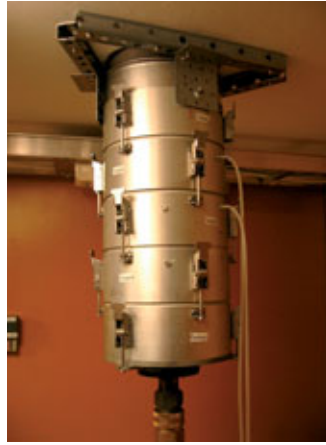
Kokeissa käytetään 20-100 -kertaista pitoisuutta ulkoilmaan verrattuna. Tämä on ns. inhalaatiomenetelmä. Sen etuihin kuuluu altistaminen aerosolien muodossa. Sitä käytettäessä ei kuitenkaan voida valita tutkittavaa ilmanlaatua. Altistuksessa on käytetty jyrksijöitä. Niillä on paljon tehokkaampi hiukkasten suodatus nenässä ja nenän sivuonteloissa kuin ihmisellä.

Vaihtoehtoisesti kokeissa voi käyttää hiukkasnäytteitä, joita on koottu tehokkaalla monivaiheimpaktorilla. Eri hiukkasista valmistetaan vesimäinen seos. Se ruiskutetaan koehenkilön, rotan tai hiiren henkitorveen tai soluviljelmään.

Tämä on ns. instillaatiomenetelmä. Sen etuna on, että tutkittava ilmanlaatu voidaan valita hiukkasten keräysten jälkeen. Usean kokoluokan hiukkasia voidaan kerätä samaan aikaan, ja hiukkasten annostus on tarkka.

Kokeissa voidaan myös eritellä vesiliukoisia, rasvaliukoisia ja liukenemattomia hiukkasia keräämisen jälkeen. Instillaatiomenetelmän huono puoli on se, että hiukkasille altistuminen poikkeaa luonnollisesta altistumisesta ruiskutuksen takia.

Inhalaatio ja instillaatio ovat menetelminä tuottaneet samansuuntaisia tuloksia, kun on tutkittu yhdyskuntailman hiukkasten vaikutuksia hengitysteiden tulehdukseen.



Kuva 7. Kansanterveyslaitoksen ja Ilmatieteen laitoksen yhteishankkeissa käytetty siirrettävä mittausasema ja suuritehoinen monivaiheimpaktori. Monivaiheimpaktori kerää mittausaseman katolla olevan ison PM_{10} -esierottimen lävitse yhdyskuntailman hiukkasia 3-4 kokoluokkaan. Ilman virtausnopeus on 850 litraa minuutissa. Oikealla on avattuna kolmivaiheinen impaktori-versio. Se kerää karkeat hengitettävät hiukkaset ($PM_{10-2.5}$) ja pienhiukkaset ($PM_{2.5-0.2}$) punertavalle polyuretaanivaahdosta valmistetulle liuskalle. Ultrapienet hiukkaset ($PM_{0.2}$) kerätään alimman tason lasikuitusuodattimelle, kuvassa äärimmäisenä vasemmalla.

Ilman hiukkasten vesiliukoiset yhdisteet todennäköisesti liukenevat ja laimenevat suhteellisen nopeasti hengitysteitä verhoavassa vetisessä nesteessä. Ne poistuvat hengitysteiden seinämästä laskimoverkoston kautta verenkiertoon. Sieltä ne jatkavat munuaisten kautta virtsaan.

Rasvaliukoiset yhdisteet sen sijaan voivat liittyä soluja verhoavaan ja niiden sisällä olevaan fosfolipidikalvostoon. Ne poistuvat elimistöstä huomattavasti hitaammin kuin vesiliukoiset yhdisteet.

Kiinteiden hiukkasten kohtalo on erilainen. Ne kulkeutuvat keuhkorakkulan valkosolujen, makrofagien, tai pintaa verhoavien epiteeli- ja dendriittisolujen sisään. Makrofagit vastaavat hengitysteiden hiukkaspuolustuksesta. Näin voi käydä myös kiinteiden pienhiukkasten, kuten nokihiukkasten pinnalle kiinnittyneille yhdisteille. Sama voi tapahtua karkeiden mineraalihiukkasten pinnalle kiinnittyneille aineille, esimerkiksi maaperän bakteerien endotoksiinille.

Keuhkorakkuloiden makrofagit ottavat aktiivisesti sisäänsä kiinteitä, karkeita hengitettäviä hiukkasia ja pienhiukkasia. Ne eivät tunnista yksittäisiä ultrapieniä hiukkasia. Niitä puolestaan ottavat sisäänsä epiteelisolut. Ultrapienet hiukkaset voivat päästä suoraan verenkiertoon näiden hengitysteiden solujen välityksellä tai soluväleistä. Siellä niille tarjoutuu tilaisuus kiinnittyä verisuonten seinämään. Ne voivat kulkeutua elimiin, joissa on vilkas verenkierto, kuten sydämeen, aivoihin, maksaan ja luuytimeen.

Hiukkasten kemialliset aineet vaikuttavat soluihin monella tapaa. Ne vaikuttavat erityisten pintareseptorien välityksellä. Tällainen on esimerkiksi endotoksiini. Ne

voivat myös aktivoida solun sisäisiä toimintoja sääteleviä valkuaisaineita ns. oksidatiivisen stressin välityksellä.

Oksidatiivista stressiä voivat aiheuttaa happiradikaalit. Niitä muodostuu metallien ja orgaanisten yhdisteiden vaikutuksesta, sekä hiukkasten pinnalla että hiukkasten aktivoimissa soluissa. Sen seurauksena solut aktivoivat omia sääteleviä valkuaisaineitaan. Ne puolestaan vaikuttavat DNA:n kopioitumiseen ja ns. sytokiinien tuotantoon. Sytokiinit säätelevät tulehdusreaktiota.

Oksidatiivinen stressi voi myös pilkkoa solujen DNA:ta. Se voi lisätä solujen kuolemista. Rasvaliukoiset PAH-yhdisteet voivat puolestaan tuottaa muuntuneita DNA-molekyylejä, jotka lisäävät syöpärisiä. Nämä ovat ns. PAH-DNA -addukteja.

Oksidatiivinen stressi tulehduttaa keuhkoputkia ja keuhkorakkuloita. Ilmiö pahentaa olennaisesti astmaa, keuhkohtaumatautia ja sydänsairauksia, kuten sepelvaltimotautia ja sydämen vajaatoimintaa. Tulehdus aiheuttaa hengitysteitä, heikentää kaasujen vaihtoa, tuottaa haitallisia autonomisia refleksejä ja lisää veren hyytymistä.

Sydän- ja verisuonisairaudet voivat pahentua myös muista hiukkasista. Kiinteät ultrapienet hiukkaset ja niiden yhdisteet tulehduttavat suoraan verisuonten seinämiä. Näin hiukkaset lisäävät ennen pitkää verisuonten kalkkeutumista ja ahtautumista. Ahtaumaplaakit voivat myös repeytyä. Se johtaa sydän- ja aivoinfarkteihin.

Vaikutukset väestön terveyteen

Yhdyskuntailman hiukkasten pitoisuuksien yhteyksiä väestön terveyteen voi tutkia rekistereistä tai seuraamalla valittua väestön otosta. Valtaosa kaikista epidemio-

Hiukkaskokoluokka	Lyhytaikainen altistuminen	Pitkäaikainen altistuminen
Karkeat hiukkaset (2,5-10 µm)	Astma ja keuhkohtaumatauti pahentuvat Hengitystieinfektiot	Keuhkohtaumatauti?
Pienhiukkaset (< 2,5 µm)	Astma ja keuhkohtaumatauti pahentuvat Hengitystieinfektiot Sepelvaltimotauti ja aivoverenkiertosairaudet pahentuvat	Elinikä lyhenee Keuhkohtaumatauti Verisuonten kalkkeutuminen voimistuu Astma? Allergia?
Ultrapienet hiukkaset (< 0,1 µm)	Astma pahentuu Sepelvaltimotauti pahentuu	Ei tutkimustietoja

Taulukko 4. Hengitettävien hiukkasten kokoluokkiin liitettyjä haittoja. (WHO 2000 ja 2004, USEPA 2004).

logisista tutkimuksista on tehty aikasarjoina. Ne ovat muutaman kuukauden tai vuosien pituisia.

Monimutkainen epidemiologinen analyysi tutkii päivittäisten hiukkaspitoisuuksien yhteyttä väestön rekisteritietoihin, kuten kuolleisuuteen tai sairaaloiden antamiin hoitoihin. Pienissä väestöotoksissa on myös mitattu esimerkiksi keuhkojen tai sydämen oireita ja toimintaa, sekä tulehduksen tai kudosaivaurion merkkiaineen pitoisuutta veressä.

Kansanterveyslaitoksen epidemiologisissa tutkimuksissa on mitattu myös henkilön omaa altistumista tai kodin ja sen ympäristön hiukkasia. Vain Yhdysvalloissa on toistaiseksi tehty muutamia pitkään kestäneitä isoja väestöseurantajoja eli ns. kohorttitutkimuksia. Niissä on voitu arvioida, miten pitkään kestävä hiukkasille altistuminen vaikuttaa. Lisääkö se esimerkiksi kroonisia keuhko- ja sydänsairauksia ja lyhentääkö se elinikää?

Yhdyskuntailman hiukkasmaisille saasteille herkkiä väestöryhmiä ovat ne yli 65-vuotiaat, jotka sairastavat keuhko- ja sydänsairauksia. Muita herkkiä ryhmiä ovat astmaatitot ja pienet lapset.

Suomi on kaupungistunut voimakkaasti viime vuosikymmeninä. Väestö ikääntyy nopeasti. Astma ja allergiat ovat yleistyneet. Ne ovat lisänneet altistuvien ja herkkiin väestöryhmiin kuuluvien ihmisten määrää.

Aikuisiän diabetes näyttää lisäävän sydänsairaana riskiä saada haittoja pienhiukkasista. Yksilön herkkyyteen vaikuttavat myös perintötekijät jotka säätelevät tulehdusta välittävien aineiden tuotantoa. Sama hiukkasille altistuminen voi joissakin henkilöissä tuottaa tavallista voimakkaamman tulehduksen.

Jos tulehduksia hillitseviä antioksidantteja saa ravinnosta vähän, voi myös se herkistää hiukkasten vaikutuksille. Myös sosio-ekonomiset tekijät vaikuttavat. Huonommassa asemassa olevat altistuvat hiukkasille keskimääräistä enemmän ja kärsivät haitoista muita herkemmin. Tämä voi johtua esimerkiksi piilevistä tai huonosti hoidetuista kroonisista sairauksista, myös huonommasta ravinnosta.

Epidemiologiset analyysit ovat kehittyneet 1990- ja 2000-luvuilla paljon. Tutkimuksissa on yhä paremmin huomioitu ne tekijät, jotka sekoittavat tulosten tulkin-taa. Laskelmiin vaikuttavat esimerkiksi mittausten toisto, ilman lämpötila, influenssaepidemia ja passiivinen altistuminen tupakansavulle. Näin ollen tutkijat voivat yhä paremmin todeta yhä pienemmät tilastolliset yhteydet, joita löytyy ilmansaasteiden pitoisuuden ja terveydellisten vaikutusten välillä. Terveydelliset haitat ovat useimmiten suorassa yhteydessä yhdyskuntailman hiukkasten pitoisuuteen. Mitään selvää kynnyspitoisuutta vaikutusten alkamiselle ei ole kuitenkaan todettu.

Monien tutkimusten tulokset yhdistetään ns. meta-analyseissä. Ne ovat osoittaneet, että yhdyskuntailman päivittäisen PM_{2,5}-pitoisuuden vaikutus kuolleisuuteen on noin kaksinkertainen verrattuna saman suuruiseen PM₁₀-pitoisuuden lisäykseen. Useiden vuosien keskiarvoissa pitoisuuksiin liittyy puolestaan moninkertainen kuolleisuuden lisäys. Tämän arvellaan johtuvan siitä, että jatkuva pienikin altistuminen hiukkasille pahentaa kaiken aikaa kroonisia hengitys- ja sydänsairauksia. Korkeiden päivittäisten hiukkaspitoisuuksien arvioidaan nykyisin vaikuttavan hengitys- ja sydänsairauksiin paljon pitempään kuin vain muutamia päiviä. Vaikutukset voivat kestää jopa 1-2 kuukautta.

Hiukkasparametri	Tarkastelujakso	Kuolleisuuden lisäys
PM ₁₀ (10 µg/m ³)	Päivittäinen pitoisuusvaihtelu	0,2 % – 0,8 %
PM ₁₀ (10 µg/m ³)	Vuosien keskiarvo-pitoisuuksien ero	1 % – 4 %
PM _{2,5} (10 µg/m ³)	Päivittäinen pitoisuusvaihtelu	0,6 % – 1,2 %
PM _{2,5} (10 µg/m ³)	Vuosien keskiarvo-pitoisuuksien ero	6 % – 17 %

Taulukko 5. Hiukkastutkimuksissa havaittu kuolleisuuden lisääntyminen eri väestöryhmissä (Pope ja Dockery 2006).



Lehtikuva/Tar Tass

Toistaiseksi on tutkittu vähän sitä, miten hiukkas-ten kemiallinen koostumus ja päästölähde vaikuttavat herkkien väestöryhmien terveyteen. Hengitys- ja sydän-sairauksien on osoitettu pahenevan polttolähteiden, kuten vilkkaan liikenteen lähellä, sekä hiilen ja puun pienpolton takia.

Terveyshaittoja voivat aiheuttaa myös esimerkiksi teollisuusprosessien hiukaspäästöt. On kuitenkin epä-selvää, missä määrin ihmiset altistuvat epätavallisen voi-makkaasti näille matalien lähilähteiden päästöille. Osa noesta ja hiiliyhdisteistä syntyy epätäydellisen palamisen tuloksena. Ei tiedetä, missä määrin ne ovat haitallisempia muiden lähteiden hiukkasiin verrattuna. Sama pätee kuumien prosessien synnyttämiin metallihiukkasiin.

Suomalaisissa kaupungeissa mitatut hiukkas-ten pitoisuudet ovat suhteellisen matalia. Lähialueilta metsä-, maasto- ja kulotuspaloista tulevat savut ovat poikkeuk-sia, samoin keväiset katupölyä tuottavat jaksot.

Metsäpalot kohottavat voimakkaasti $PM_{2.5}$ -pitoi-suutta ja katupöly $PM_{10-2.5}$ -pitoisuutta. Tutkimukset vaikutuksista kaupungeissa lyhyellä aikavälillä osoitta-vat, että meillä on kirjo samanlaisia terveyshaittoja kuin muualla Euroopassa tai Yhdysvalloissa.

Esimerkiksi pääkaupunkiseudulla mitatut PM_{10} -pitoisuuden päivittäiset vaihtelut ovat yhteydessä kuol-leisuuteen. $PM_{2.5}$ -pitoisuuden ja ultrapienien hiukkas-ten määrien vaihtelut ovat yhteydessä lasten ja aikuisten astmaan sekä siihen, että ikääntyneiden sepelvalti-motauti pahenee.

Suomessa on myös selvitetty, miten hiukkas-ten vaikutus syntyy elimistössä. On tutkittu sydämen sähköistä toimintaa ja keuhkojen kudosaauriota. Tässä yhteydessä ovat erityisesti liikenteen pakokaasut tulleet vahvasti esiin.



Suomessa ulkoilman laatua säätelevät EU:n direktiivit ja kansalliset asetukset. Niissä on määritelty eri epäpuhtauksille pitoisuuksia, joita ei saisi ylittää. Säännökset ovat joko laillisesti sitovia, tavoitteellisia tai ohjeellisia, ja niihin liittyy usein tiedotusvelvoite.

Terveystutkimuksen avulla yhdyskuntien ilmalle on määritely sitovia raja-arvoja. Käytössä on myös ei-sitovia tavoite- ja ohjearvoja, joita ei pitäisi ylittää. Näitä pitoisuuksia on määritelty tunnin, joskus kahdeksan tunnin ja vuorokauden keskiarvopitoisuudelle, samoin vuoden keskiarvopitoisuudelle. Tarkoituksena on estää ja vähentää terveydellisiä haittoja, jotka aiheutuvat lyhyt- ja pitkäaikaisesta altistumisesta eri ilmansaasteille.

Raja- ja ohjearvojen tunti- ja vuorokausipitoisuuksiin liittyy usein tarkka määrä sallittuja ylityksiä. Poikkeukselliset päästöt ja sää voivat vaikuttaa ylityksiin. Rajat on määritelty mittausarvojen jakaumasta jonkun sen kriittisen kohdan avulla. Toinen keino on määrittää, kuinka monta kertaa sallitun arvon saa ylittää kuukaudessa tai vuodessa.

Kynnysarvo ilmoittaa, että terveydelle haitallinen pitoisuus on ylittynyt. Tiedotuskynnyksen ylittyminen puolestaan velvoittaa viranomaisia tiedottamaan ihmisille huonosta ilmanlaadusta sillä alueella, johon huono ilma vaikuttaa. Varoituskynnyksen ylittyminen edellyttää tiedottamisen lisäksi, että kyseiselle epäpuhtaudelle herkkiä väestöryhmiä aletaan suojella.

Kansalliset ohjearvot

Suomen ensimmäiset kansalliset ulkoilman ohjearvot annettiin 1984. Niitä edelsivät Lääkintöhallituksen suositukset. Vuonna 1987 Maailman terveysjärjestö WHO antoi Euroopan alueelle 22:n eri epäpuhtauden ohjearvot. Arvoja annettiin sekä ulko- että sisäilmalle. Ne tarkoitettiin WHO:n jäsenmaille ohjeeksi, jonka pohjalta kukin maa voi kehittää omaa ilmansuojeluaan.

Ympäristöministeriö asetti loppuvuodesta 1991 työryhmän, joka alkoi uudistaa aiempia kansallisia ohjearvoja. Syynä olivat uudet tutkimustulokset kotimaassa ja ulkomailla. Niissä oli tutkittu kaasu- ja hiukkasmaisten epäpuhtauksien vaikutuksia herkkien väestöryhmien terveyteen.

Ilmanlaadun ohjearviotyöryhmän mietintö esitti 1993 laajan katsauksen siitä, mitkä ovat tärkeimmät epäpuhtaudet, niiden päästöt ja ulkoilman pitoisuudet Suomessa. Se ehdotti terveystutkimusten perusteella uusia kansallisia ohjearvoja kuudelle eri epäpuhtaudelle. Ehdotuksia pidettiin varsin kireinä. Ne huomioivat muun muassa sen, että talvipakkanen voimistaa rikkidioksidin ja typpidioksidin vaikutuksia. Pakkanen lisää astmaatikon oireita ja voi myös heikentää keuhkojen toimintaa.

Työryhmä ehdotti ensi kertaa ohjearvoja hengittävälle hiukkasille (PM₁₀) ja haisevien rikkiyhdisteiden määrälle. Valtioneuvosto vahvisti Ympäristöministeriön taloudellisen ja teknillisen selvityksen jälkeen työryhmän ehdottamat ohjearvot vuonna 1996.

Epäpuhtaus	Aika	Ohjearvo
Hiilimonoksidi (CO)	tunti 8 tuntia	20 mg/m ³ enimmäispitoisuus 8 mg/m ³ enimmäispitoisuus
Typidioksidi (NO ₂)	tunti vrk	150 µg/m ³ kuukauden 99. prosenttipiste 70 µg/m ³ kuukauden 2. suurin arvo
Rikkidioksidi (SO ₂)	tunti vrk	250 µg/m ³ kuukauden 99. prosenttipiste 80 µg/m ³ kuukauden 2. suurin arvo
Hiukkaset, kokonaisleijuma (TSP)	vrk vuosi	120 µg/m ³ vuoden 98. prosenttipiste 50 µg/m ³ enimmäispitoisuus
Hengittävät hiukkaset (PM ₁₀)	vrk	70 µg/m ³ kuukauden 2. suurin arvo
Haisevat rikkiyhdisteet (TRS)	vrk	10 µg/m ³ kuukauden 2. suurin arvo, TRS ilmoitetaan rikkiinä

Taulukko 6. Suomen kansalliset ilmanlaadun ohjearvot.



Lehtikuvaa/Ville Myllynen

Uudet kansalliset ohje-arvot otettiin tehokkaasti käyttöön ilman laadun mittausten vertailuarvoiksi. Tätä ei hidastanut se, että Suomi oli 1995 liittynyt EU:n jäseneksi.

EU:n silloiset raja-arvot olivat pahasti vanhentuneet. Ne eivät enää vastanneet 1990-luvun tietämystä. Kansallisia ohje-arvoja alettiin käyttää yhä enemmän liikenteen ja yhdyskuntien suunnittelussa. Myös teollisuus ja energiantuottajat ottivat ne hankkeissaan huomioon.

Kansalliset ohje-arvot ovat edelleen voimassa. Ne sääntelevät joitakin epäpuhtauksia, jotka puuttuvat uusista EU-direktiiveistä. Näitä ovat esimerkiksi haisevat rikkiyhdisteet ja kokonaisleijuma. Ohje-arvoja on myös joillekin ajoille, jotka täydentävät EU:n raja-arvoja.

Kaasumaisten epäpuhtauksien tuntiohje-arvot ovat Suomessa EU:n raja-arvoja kireämpiä. Suomen nykyiset ilmansuojelua koskevat periaatteet on esitetty vuoden 2000 ympäristönsuojelulaissa ja ympäristönsuojeluasetuksessa.

EU:n ilmansuojelun direktiivit

Euroopan komissio alkoi 1990-luvun puolivälissä uudis-

taa vanhentunutta ilmansuojelua koskevaa lainsäädäntöään. Se sopi WHO:n Euroopan toimiston kanssa, että vaikutuksia terveyteen arvioidaan asiantuntijoiden riippumattomissa ryhmissä. Niihin osallistui suuri joukko johtavia eurooppalaisia ja yhdysvaltalaisia tutkijoita ja asiantuntijoita.

Työn tuloksena syntyivät vuosina 1994–1996 laajat terveysvaikutusten arviot. Vuonna 2000 annettiin täysin uudistetut WHO-ohje-arvot. EU-komission työryhmät hyödynsivät niitä, kun ne määrittivät epäpuhtauksien raja-arvoja ja muita arvoja. EU:n ja WHO:n yhteistyö ilmansaasteiden vaikutusten arvioinnissa jatkuu edelleen.

Vuonna 1996 EU:ssa hyväksyttiin ilmansuojelun puitedirektiivi. Sen perusteella on myöhemmin vuosina hyväksytty neljä ns. tytärdirektiiviä. Viimeinen näistä direktiiveistä tulee jäsenmaissa voimaan viimeistään 2007 alussa. Silloin Suomikin ottaa käyttöön uudet tavoitearvot. Niiden avulla pyritään alentamaan metalliteollisuuden lähiympäristöjen raskasmetallien sekä liikenteen ja puun pienpolton ympäristöjen PAH-yhdisteiden pitoisuuksia. Tavoitevuosi on 2012 loppuun mennessä.

Direktiivi	Säädösvuosi	Terveyttä suojelevat määräykset
Euroopan neuvoston direktiivi (96/62/EY)	1996	Ilmanlaadun arviointi ja hallinta
Euroopan neuvoston direktiivi (1999/30/EY)	1999	SO ₂ , NO ₂ , PM ₁₀ ja Pb:n raja-arvot
Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (2000/69/EY)	2000	CO:n ja bentseenin raja-arvot
Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (2002/3/EY)	2002	Otsonin kynnysarvot
Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (2004/107/EY)	2004	As, Cd, Ni ja bentso[a]pyreenin tavoitearvot

Taulukko 7. EU:n ilmansuojelun direktiivejä.

Taulukossa 7 esitettyjen EU-raja-arvojen lisäksi kahdelle epäpuhtaudelle on määritelty myös varoituskynnykset. Kun ne ylittyvät kolmena tuntina peräkkäin, on viranomaisten välittömästi tiedotettava siitä alueen

väestölle. Samalla on suojeltava herkkiä väestöryhmiä. Rikkidioksidin varoituskynnys on 500 µg/m³ ja typpi-dioksidin 400 µg/m³.

Epäpuhtaus	Aika	Raja-arvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sallitut ylitykset
Hiilimonoksidi (CO)	8 tuntia	10 mg/m^3	-
Typidioksiidi (NO ₂)	tunti vuosi	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18 tuntia / vuosi -
Rikkidioksiidi (SO ₂)	tunti vrk vuosi/talvi	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 tuntia / vuosi 3 vrk / vuosi -
Hengitettävät hiukkaset (PM ₁₀)	vrk vuosi	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 vrk / vuosi -
Lyijy	vuosi	0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
Bentseeni	vuosi	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-

Taulukko 8. Suomessa voimassa olevat EU:n raja-arvot.

Nykyisillä EU-mailla on eniten ongelmia saavuttaa PM₁₀-hiukkasia koskevat vaatimukset. Vuorokautiset raja-arvot ylittyvät monissa maissa yli 35 kertaa vuodessa. Näin käy myös Suomen pääkaupunkiseudulla. Tämän ongelman aiheuttaa tosin katujen talvihiekoitus, johon meille on sallittu poikkeus, ja raja-arvon saa ylittää.

Jäsenmaat ovat haluttomia vähentämään PM₁₀:n vuorokautisen raja-arvon sallittuja ylityksiä. Ne eivät halua alentaa myöskään vuotuista raja-arvoa, kuten vuonna 1999 annettu tytärdirektiivi alustavasti esitti. Ongelmia on odotettavissa myös typidioksidin raja-arvojen saavuttamisessa. Ne tulevat täysimääräisinä voimaan vuonna 2010.

Tavoite- / kynnysarvon peruste	Aika	Arvo	Sallitut ylitykset
Terveystien suojeleminen vuonna 2010	8 tuntia	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 kpl / vuosi 3 vuoden keskiarvona
Väestölle tiedottaminen	tunti	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
Väestön varoittaminen	tunti	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-

Taulukko 9. Otsolin EU-kynnysarvot Suomessa ja tavoite vuodelle 2010.

Otsonille ei ole pystytty antamaan sitovia raja-arvoja. Sen pitoisuuksien alentaminen ei onnistu kansallisesti. Alentaminen vaatii koko eurooppalaisen yhteisön työtä, joka kestää pitkään. Otsonille asetettu kahdeksan tunnin tavoitearvo on Suomessa jo saavutettu toisin kuin lukuisissa muissa EU-maissa. Niissä ylityksiä on huomattavasti enemmän.

Otsonin tiedotuskynnys on muutama keväänä tai kesänä ylittynyt Etelä-Suomessa. Syynä on Keski-Euroopasta tai Venäjältä kulkeutunut otsonilautta.

Epäpuhtaus	Tavoitearvo / vuosi
Arseeni	6 ng/m^3
Kadmium	5 ng/m^3
Nikkeli	20 ng/m^3
Bentso[a]pyreeni	1 ng/m^3

Taulukko 10. Suomessa 2007 voimaan tulevat raskasmetallien ja bentso[a]pyreenin tavoitearvot.

Taulukossa 10 esitetyt epäpuhtaudet ovat syöpää aiheuttavia aineita, jotka liittyvät ulkoilman hiukkasiin. Niitä mitataan PM₁₀:stä. Raskasmetallit heikentävät ilmanlaatua joidenkin metalliteollisuuden laitosten lähistöllä.

Korkeiden PAH-pitoisuuksien ongelmalliset paikat tiedetään. Niitä on siellä, missä puuta ja hiiltä poltetaan

yleisesti pienlämmityksessä. PAH-pitoisuudet kohoavat myös dieseliä käyttävien ajoneuvojen ja työkonien lähistöllä sekä joidenkin metalleja jalostavien laitosten lähistöllä. Bentso[a]pyreeni edustaa mittauksissa kaikkia syöpävaarallisia PAH-yhdisteitä.

Ehdotus EU:n uudeksi ilmansuojelun strategiaksi

EU-komissio julkisti syyskuussa 2005 ehdotuksen unionin ilmansuojelun strategiasta vuoteen 2020. Samalla se teki ehdotuksen uudesta ilmanlaatudirektiivistä. Sen tarkoitus on yhdistää ja yhtenäistää useita aiemmin annettuja direktiivejä. Direktiivi aloittaa myös PM_{2,5}-hiukkasten sääntelyn Euroopassa.

Ilmansuojelun strategia sisältää lukuisia uusia ehdotuksia pienhiukkasten päästöjen vähentämiseksi eri aloilla. Tähän mennessä päätettyjä päästöjen vähennyksiä ei pidetä riittävinä. Ne eivät alenna riittävästi pienhiukkasten pitoisuuksia ja vähennä ihmisten terveyteen kohdistuvia haittoja.

Puhdasta ilmaa Euroopalle -ohjelma (CAFE) on arvioinut, että ulkoilman pienhiukkaset pahensivat vuonna 2000 EU-maissa lähes 350 000 sydän- ja hengityssairaan tilaa siten, että se johti kuolemaan. Pitkään jatkuneen pienhiukkaskasille altistumisen arvioitiin lyhentäneen näiden ihmisten elinikää jopa kymmenellä vuodella.

Pienhiukkaset lisäsivät myös sairauksien lääkekuluja, poissaoloja työstä ja koulusta ja hoitopäiviä sairaala-

loissa. Ne heikensivät merkittävästi arviolta kymmenien miljoonien ihmisten toimintakykyä EU:n 450-miljoonaisessa väestössä.

Terveydellisistä haitoista aiheutuneet suorat ja epäsuorat taloudelliset menetykset arvioitiin 270–780 miljardiksi euroksi vuodessa. Siitä lisääntyneen sairastamisen osuus oli noin 78 miljardia euroa. Loput kulut tulivat siitä, että ennenaikaiselle kuolemalle laskettiin eri tavoin hinta.

Myös toisen keskeisen ulkoilman epäpuhtauden eli otsonin vaikutukset terveyteen arvioitiin. Sen vaikutukset olivat murto-osa pienhiukkasten aiheuttamista haitoista. Otsoni aiheutti noin 21 000 ennenaikaista kuolemaa vuonna 2000. Taloudelliset menetykset kuolleisuuden ja sairastamisen takia olivat 7–9 miljardia euroa.

Arvioitu terveydellinen haitta	EU25	Suomi
Ennenaikaisia kuolemantapauksia	347 900	1 270
Menetettyjä elinvuosia	3 618 700	13 840
Imeväiskuolemia (0-1 v)	677	2
Kroonisia keuhkoputkentulehduksia (27 v →)	163 800	620
Hengitys- ja sydänsairaiden sairaalaan ottoja (0-100 v)	100 300	383
Lasten hengityseläkkeiden käyttöpäiviä (5-14 v)	4 218 500	11 310
Aikuisien hengityseläkkeiden käyttöpäiviä (20 v →)	27 741 700	104 450
Lasten alempien hengityselinten oirepäiviä (5-14 v)	192 756 400	778 870
Työikäisten vajakuntoisuuspäiviä (15-64 v)	347 687 000	1 323 390
Taloudelliset menetykset	268–781 miljardia euroa/vuosi	1–2,9 miljardia euroa/vuosi

Taulukko 11. Pienhiukkasten ($PM_{2,5}$) vaikutuksia terveyteen Euroopassa ja Suomessa vuonna 2000.

CAFE-selvityksessä puhtain maa oli Suomi. Pienhiukkaset aiheuttivat kuitenkin Suomessa vuonna 2000 arviolta lähes 1 300 ennenaikaista kuolemaa ja yli 600 uutta pysyvää keuhkoputkentulehdusta.

Lisäksi arviolta kymmenien tuhansien hengitys- ja sydänsairaiden ja lasten vointi huononi toistuvasti ulkoilman pienhiukkasten vuoksi. Myös lääkkeiden käyttö lisääntyi. Lisääntyneet terveydelliset haitat aiheuttivat arviolta 1–2,9 miljardin euron suorat ja epäsuorat taloudelliset menetykset vuodessa.

CAFE-arvio esittää korkeita lukuja pienhiukkasten aiheuttamista ennenaikaisista kuolemista, kun niitä vertaa aikaisempiin arviointeihin. Tämä näkyy Suomenkin luvuissa. Kansallinen ympäristöterveysohjelma 1997 esitti kaikkien ilmansaasteiden vaikutukseksi vain 200–400 kuolemantapausta vuodessa.

Suuri ero johtuu siitä, että tieteellinen tieto on muuttunut. CAFE-kuolleisuusarviot perustuvat pitkän ajan $PM_{2,5}$ -altistumiseen vuosien ja vuosikymmenten ajaksolla. Niihin on epidemiologisissa tutkimuksissa liitetty paljon suuremmat pienhiukkasten vaikutukset kuin vuorokautisiin altistumisiin. Aiemmin käytettiin vuorokautisia haitta-arvioita.

Itse asiassa CAFE-kuolleisuusarvioissa on käytetty pitkän ajan altistumiseen liitettyä matalahkoa arviota. Se tarkoittaa kuuden prosentin lisääntynyttä kuolleisuutta jokaista $PM_{2,5}$ -vuosipitoisuuden nousua $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kohti. Ei ole varmuutta siitä, voidaanko tämä kaikki liittää yksinomaan pienhiukkasiin. Lisätekijöinä voisivat olla esimerkiksi kaasumaiset epäpuhtaudet, altistuminen tupakansavulle, muut sisäilman epäpuhtaudet ja epäterveellinen ravinto.

Tutkijat tarkastelevat usein menetettyjen elinvuosien määrää koko väestön tilastollisen eliniän lyhentymisenä. EU:n 25 maan joukossa se oli 8,1 kuukautta ja Suomessa 2,6 kuukautta vuonna 2000. Tällainen tarkastelu kuitenkin häivyttää sen, että tietyissä sairastavien ryhmässä elinajan lyhentyminen saattaa olla jopa kymmenen vuotta.

CAFE:n esittämät suuret taloudelliset menetykset hätkähdyttävät. Suuri osa eli reilut kaksi kolmasosaa alimmasta summasta johtuu ennenaikaisen kuoleman "hinnasta". Tätä tieteellisesti oikein tehtyä arviointia voi tietenkin arvostella. Silloin on hyvä muistaa, että pelkkä sairastamisen lisääntyminen aiheuttaa paljon kuluja. Kaiken lisäksi CAFE:n arviot pitkäaikaisesti sairastavien lisääntymisestä ja hoidoista sairaaloissa vaikuttavat suuresti aliarvioiduilta. Tämä johtuu siitä, että luotettavat tutkimustiedot puuttuvat.

Ehdotetun ilmansuojelun strategian on arvioitu vähentävän pienhiukkasten ja otsonin aiheuttamia ennenaikaisia kuolemia 38 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. Elinvuosien menetys vähenisi jopa 47 prosenttia. Ilmansuojelustrategian toteutus aiheuttaisi arviolta 5–8 miljardin euron vuotuiset lisäkulut EU-maissa. Toisaalta terveydellisistä haitoista aiheutuva taloudellinen menetys pienentyisi vuosittain arviolta 42–135 miljardilla eurolla.

Ilmansuojelustrategiaan ja direktiiviehdotukseen liittyviä asiakirjoja löytyy EU-komission internet-osoitteesta. Asiakirjoja on useita tuhansia sivuja: <http://europa.eu.int/comm/environment/air/cafe/>.

Ehdotettu ilmanlaadudirektiivi säätelisi pienhiukkasten määrää raja-arvon kaltaisella sitovalla $PM_{2,5}$ -pitoisuudella. Se on vuosikeskiarvona $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se tulisi voimaan kaikkialla jo vuonna 2010. Ehdotukseen liittyy tavoite alentaa 20 prosenttia vuotuisia pitoisuuksia vuoteen 2015 mennessä. Se ei ole sitova.

Eurooppalaiset ilmansaasteiden terveysvaikutusten tutkijat ovat pitäneet CAFE-strategiaa oikeansuuntaisena. Samalla he ovat toivoneet, että EU-komissio esittäisi kunnianhimoisempia tavoitteita $PM_{2,5}$ -pitoi-

suuksien alentamiselle. Ilmanlaadudirektiivissä esitettyä PM_{2,5}-vuosipitoisuuden sääntelyä on pidetty teholtaan heikkona. Samalla on suorastaan paheksuttu monien maiden ehdottamia lievennyksiä nykyiseen PM₁₀-pitoisuuksien sääntelyyn.

EU-tutkimushankkeita johtaneet ja WHO-asiantuntijoina toimineet terveystutkijat ovat ilmaisseet huolensa hyvin harvinaisella tavalla. He ovat lähettäneet yhteisen kirjeen Euroopan parlamentin ympäristökomitealle: <http://www.iras.uu.nl/EPLetter/EUletterFINAL.pdf>.

EU:n jäsenmaiden ja Euroopan parlamentin näkemykset PM_{2,5}-sääntelystä ovat hyvin hajallaan. Juuri nyt on vaikea saada aikaan kovin edistyksellistä yhteistä päätöstä. Tätä lienee ennakoitu. Komissio ehdottaa, että nyt päätettävää PM_{2,5}-pitoisuuden sääntelyä tarkistettaisiin jo viiden vuoden kuluttua. Siihen mennessä komissio toivoo myös saavansa uutta tutkimustietoa mm. PM_{2,5}-pitoisuuksista, pienhiukkasten lähteistä ja hiukkasten koostumuksista sekä niiden vaikutuksista terveyteen Euroopassa.

Ilmanlaadudirektiivin ehdotukset PM_{2,5}-pitoisuuksien sääntelystä näyttävät ohjaavan EU:n jäsenmaita suhteellisen heikosti siihen, että ne alentaisivat nykyisiä pienhiukkasten pitoisuuksia. Muut tahot ovat olleet edistyksellisempiä.

Maailman terveysjärjestön WHO:n asiantuntijoiden raportissa on julkaistu ehdotukset maailmanlaajuisiksi

ohjearvoiksi. Yhdysvaltojen ympäristöviraston USEPAN uudet ilmanlaadun standardit ovat myös selvästi tiukempia. Tosin määrittelyissä on eroja EU:hun verrattuna. Erot liittyvät muun muassa massapitoisuuden mittauspaikkoihin ja sallittuihin ylityksiin.

EU-komission ja jäsenmaiden varovaisuus johtunee monesta syystä. Euroopasta ei ole tietoja yhtenäisellä tavalla mitatuista PM_{2,5}-pitoisuuksista. Ilmansuojelun strategia ehdottaa pienhiukkasia tuottavien päästöjen vähentämistä monilla aloilla, mutta niistä ei ole mitään määrällistä varmuutta eikä toteutumisen aikataulua.

Määräyksen / ohjeen antaja	PM _{2,5} vuosipitoisuus	PM _{2,5} vrk-pitoisuus
EU-komission ehdotus 2005	25 µg/m ³	-
USEPA:n määräykset 1997	15 µg/m ³	65 µg/m ³
USEPA:n määräykset 2006	15 µg/m ³	35 µg/m ³
WHO:n globaalit ohjearvot 2006	10 µg/m ³	25 µg/m ³

Taulukko 12. Pienhiukkasten (PM_{2,5}) vuosi- ja vuorokausipitoisuuksia koskevien säännösten ja ohjeiden vertailua.







4 Ohjelmasta uutta tietoa

Terveystutkimus FINEssä

FINE-teknologiaohjelmaan kuului neljä altistumista tai terveyttä koskevaa tutkimushanketta. Niistä kaksi oli Tekesin rahoittamia. Toinen jatkuu Euroopan aluekehitysrahaston EAKR:n rahoituksella. Kahta rahoitti Suomen Akatemia.

Hankkeisiin osallistui Suomessa neljä tutkimuslaitosta, kaksi ammattikorkeakoulua, kaksi yritystä ja Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV).

Hankkeita oli vähän. Ne kuitenkin kuvastavat laajaa monitieteistä osaamista. Osaaminen on kehittynyt Suomeen kansallisissa tutkimusohjelmissa ja lukuisissa EU-hankkeissa. FINE:n terveyttä koskeneista tutkimushankkeista julkaistiin ohjelmakauden loppuun mennessä yhteensä 20 tieteellistä artikkelia ja 48 muuta julkaisua. Tuloksia julkaistaan edelleen lähivuosina.

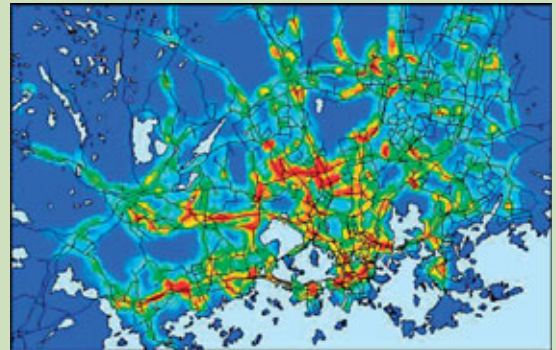
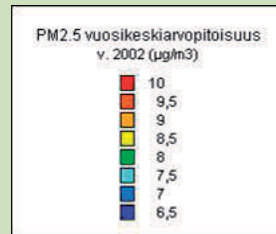
Kokonaismalli pienhiukkasten päästöjen, leviämisen ja riskin arviointiin – KOPRA

KOPRA-hankkeessa on kehitetty malli Suomen kaikkiin pienhiukkaspäästöihin liittyvien terveysvaikutusten arvioimiseksi. Malli alkaa päästöistä ja leviämisestä ja etenee altistumisen arvioinnin kautta vaikutuksiin. KOPRA arvioi myös päästövähennysten nettohyötyjä ja kuluja.

Malli on huomattavasti tarkempi kuin CAFE-ohjelman käyttämä karkea alueellinen RAINS-malli. KOPRA jakaa Suomen 10x10 kilometrin ruutuihin, kun taas RAINS-mallissa ruutujen koko oli 50x50 kilometriä.

Pienhiukkasten riskiarvioinnin mallissa on hyödynnetty kansainvälisen asiantuntijapaneelin haastatteluja ja alueellisia tietoja päästöistä. Työssä on myös käytetty YTV:n mittauksiin verrattuja leviämismallien tuloksia.

- Hankkeen yhdenmennetty malli voi arvioida pienhiukkasten päästöjä, kemiallista ja fysikaalista muuntumista, pitoisuuksia ilmassa, väestön altistumista pienhiukkasille sekä pienhiukkasten aiheuttamaa terveydellistä riskiä.
- Mallinnuksen työkalua voi hyödyntää jatkossa esimerkiksi arvioitaessa, miten pienhiukkasten päästöjä ja pitoisuuksia voitaisiin vähentää tehokkaasti mahdollisimman pienin kustannuksin.
- Alustavien tulosten mukaan Suomen pienhiukkasten päästöt aiheuttavat muutama sata ennen aikaista kuolemaa. Näistä huomattava osa johtuu ihmisten lähellä olevista päästöistä, kuten liikenteestä ja kotitalouksien puunpoltosta.



Kuva 8: Mallinnettuja PM_{2,5}-pitoisuuksia pääkaupunkiseudulla (Ilmatieteen laitos 2006).

Yhteyshenkilö: Jaakko Kukkonen, Ilmatieteen laitos, Ilmanlaatu, Helsinki.

Osallistuneet laitokset: Ilmatieteen laitos (IL), Suomen ympäristökeskus (SYKE), Kansanterveyslaitos (KTL), Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV) ja Helsingin ammattikorkeakoulu (Stadia).

Yritykset: Nordic Envicon Oy ja LT-Konsultit.

Pienhiukkasille altistumiseen vaikuttavat tekijät ja lähteet vanhusväestössä – ExFine

ExFine on tutkinut tekijöitä, jotka vaikuttavat sepelvaltimotautia sairastavien ikääntyneiden henkilöiden altistumiseen pienhiukkasille. Tutkimus osoitti, että ulkoilman kiinteän mittapisteen tuloksia voi käyttää myös silloin, kun arvioidaan paljon sisätiloissa oleskelevien henkilöiden altistumista.

Erytisen hyvin ulkoilman mittaukset kuvastivat sitä, miten ihminen altistuu jatkuvasti hiukkasille, joille ei ole sisälähteitä. Pääkadun varrella asuminen ja liikenteen läheisyys lisäsivät altistumista erityisesti nokihaikeille, joita syntyy epätäydellisen palamisen yhteydessä.

- Hankkeen kyselylomakkeita voi käyttää parantamaan arviointia, jota tehdään PM_{2,5}-altistumisesta ja polttoperäisille hiukkasille altistumisesta.
- Ulkoilman epäpuhtaudet ovat tärkein sisäilman PM_{2,5}-pitoisuuksia määräävä tekijä. Altistumista voitaisiin vähentää uudenaikaisella ilmanvaihdolla ja -suodatuksella.



Kuva 9. Henkilökohtaisen altistumisen mittalaitteet kulkevat repussa. Lisää mittauksista ja mittalaitteista sivulla 11.

- Tutkimusasetelmaa on sovellettu yhteishankkeessa Barcelonassa. Sitä sovelletaan myös toisessa FINE-ohjelman hankkeessa, HIPPU-hankkeessa, Kotkassa.

Yhteishenkilö: Juha Pekkanen, Kansanterveyslaitos, Ympäristöterveyden osasto, Kuopio.

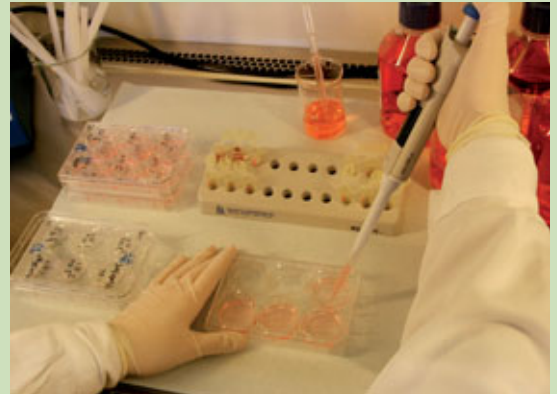
Osallistuneet laitokset: Kansanterveyslaitos (KTL) ja Institute of Risk Assessment Sciences (IRAS), Utrechтин yliopisto, Alankomaat.

Kaupunkien ilman hiukkasten fysikaalis-kemiallisten ja toksikologisten ominaisuuksien vaihtelu eri vuodenaikoina – PAMCHAR-FINE

PAMCHAR-hanke keräsi näytteitä hiukkasista neljänä vuodenaikana Helsingissä. Sama tehtiin viidessä Euroopan kaupungissa.

Tutkimus paljasti suuria eroja ultrapienien hiukkasten, pienhiukkasten ja karkeiden hengitettävien hiukkasten kemiallisessa koostumuksessa eri paikoissa, Helsingissä eri vuodenaikojenkin välillä. Kerättyjen samankokoisten hiukkasten lähteet erosivat myös toisistaan, samoin solu- ja eläinkokeissa todettu myrkyllisyys.

- Hiukkasten massan, kemiallisen koostumuksen ja merkkiaineiden, esimerkiksi levoglukosaanin, kokojakaumien tunteminen oli hyödyllistä. Niiden avulla arvioitiin paikallisten ja kaukaisten päästölähteiden osuutta erikokoisten hiukkasten massassa ja myrkyllisyydessä.
- Työssä kehitettyjä menetelmiä voi hyödyntää kansallisissa ja eurooppalaisissa hankkeissa. Niissä pyritään kenttätutkimuksin yhdistämään hiukkasten lähteiden, kemiallisen koostumuksen ja väestön altistumisen tutkimus epidemiologiseen ja toksikologiseen tutkimukseen.
- Menetelmiä on jo hyödynnetty FINE-ohjelman HIPPU-hankkeessa Kotkassa, sekä puun pienpoltton



Kuva 10. Makrofagi-soluviljelmää valmistetaan hiukkasnäytteillä tehtäviin altistuksiin.

tutkimusmenetelmiä ja hiukkaspäästöjen myrkyllisyyttä koskevassa hankkeessa. Sen on rahoittanut Tekes ja sosiaali- ja terveysministeriö.

Yhteishenkilö: Raimo O. Salonen, Kansanterveyslaitos, Ympäristöterveyden osasto, Kuopio

Osallistuneet laitokset: Kansanterveyslaitos (KTL), Ilmatieteen laitos (IL), Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV) ja Antwerpenin yliopisto, Belgia

Inflammaatio ja pienhiukkaset – HIPPU

HIPPU-hanke yhdistää kolmen aiemman EU-hankkeen eli AIRGENEn, ULTRAN ja PAMCHARin sekä usean kansallisen hankkeen menetelmien tietämyksen. Näissä hankkeissa on selvitetty pienhiukkasten lähteitä ja kemiallista koostumusta, niille altistumista ja niiden vaikutuksia terveyteen.

HIPPU-kenttätutkimus kesti 24 viikkoa eli marraskuusta 2005 toukokuuhun 2006. Se selvitti Kotkan keskustassa asuvien sepelvaltimotautia sairastavien potilaiden altistumista pienhiukkasille. Toistetuista verinäytteistä mitattiin myös niitä tulehduksen ja veren hyytymisen merkkiaineita, joita epäillään sairauden pahenemisen riskitekijöiksi.

Tutkimus jatkuu edelleen. Se selvittää kiinteällä mittausasemalla kerättyjen pienhiukkasten ($PM_{2,5}$) ja karkeiden hengitettävien hiukkasten ($PM_{10-2,5}$) kemiallista koostumusta ja lähteitä. Hiukkasia mitattiin myös jatkuvasti monilla laitteilla. Hiukkasten massasta, lukumäärästä, pinta-alasta ja mustan hiilen määrästä saadaan arvokasta lisätietoa.

- Hankkeessa kehitettiin monitieteinen tutkimusasetelma. Tällaista monin tavoin varmennettua tietoa tarvitaan, kun kehitetään EU:n ulkoilman pienhiukkasia ja päästölähdehiukkasia koskevia säännöksiä. Näin voidaan vähentää nykyiseen tietämykseen liittyviä epävarmuuksia.
- Kotkan ilmanlaatuun vaikuttavat monet päästöjen lähteet: teollisuus, satamat, tieliikenne ja Viron voimalat. Työ siellä täydentää aiempia Helsingissä



Kuva 11. HIPPU-mittausasema Pekkasan koulun pihalla Kotkansaarella.

- tehtyjä tutkimuksia. Itse asiassa ne tarjoavat hyvän kansallisen vertailun HIPPU-hankkeen tuloksille.
- Aiemmat EU-hankkeet tarjoavat hyvän kansainvälisen vertailumahdollisuuden tuloksille.
- Hankkeesta saadaan arvokasta tietoa hiukkasten vaikutusten mekanismeista. Samalla saadaan vahvistusta siihen, miten tulehdusta kuvaavia merkkiaineita voi käyttää sydänsairaiden terveystieteiden arvioinnissa.

Yhteyshenkilö: Iiris Salonen, Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu, Kotka

Osallistuneet laitokset: Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu, Kansanterveyslaitos (KTL) ja Ilmatieteen laitos (IL)



Suomalainen tutkimus on kansainvälistä

FINE-ohjelman aikana 2002–2005 lisääntyi kansainvälinen tieteellinen tieto pienhiukkasille altistumisesta ja niiden aiheuttamista terveydellisistä haitoista. Tämä tietämys on kohentunut myös Suomessa. Aiheesta on tiedotettu paljon alan asiantuntijoille, tiedotusvälineille ja suurelle yleisölle.

Kansanterveyslaitoksen, Ilmatieteen laitoksen ja Helsingin yliopiston fysiikan laitoksen tutkimusryhmät ovat osallistuneet lukuisiin EU:n 5. ja 6. puiteohjelman monitieteisiin hankkeisiin. Kaikilla FINE-terveysosion hankkeilla on kytkentöjä pienhiukkasten terveydellisiä vaikutuksia tutkineisiin EU-hankkeisiin.

Projektin lyhenne + EU-rahoitusvuodet	Tutkimusaihe	Kohdekaupungit	Lisätietoja
HEAPSS 2001-03	Ilmansaasteiden terveysvaikutukset sydäninfarktin sairastaneissa potilaissa	Augsburg, Barcelona, Helsinki, Rooma, Tukholma	www.epiroma.it/heapss
RUPIOH 2002-04	Ultrapienten ja pienten hiukkasten sisä-ulkosuhteet ja yhteydet hengityselinten terveyteen	Amsterdam, Ateena, Birmingham, Helsinki	www.iras.uu.nl/
PAMCHAR 2002-04*	Karkeiden, pienten, ja ultrapienten hiukkasten kemiallinen ja toksikologinen karakterisointi	Amsterdam, Ateena, Barcelona, Duisburg, Helsinki, Praha	www.pamchar.org
AIRGENE 2003-06	Ilmansaasteiden yhteys tulehdusvasteisiin sydäninfarktin sairastaneissa henkilöissä: geenien ja ympäristön yhteisvaikutukset	Ateena, Augsburg, Barcelona, Helsinki, Rooma, Tukholma	www3.gsf.de/epi/en/ag_epi_luftsch_1.html#airgene

Taulukko 13. FINE-ohjelmakauden kansainvälisiä hankkeita, joissa suomalaiset tutkimusryhmät ovat tutkineet kaupunki-ilman pienhiukkasille altistumista ja terveysvaikutuksia.

*PAMCHAR oli Kansanterveyslaitoksen koordinoima hanke.

Lukuisia suomalaisia asiantuntijoita on osallistunut pienhiukkasia koskeviin altistumisen ja terveysvaikutusten arviointeihin. Suomalaiset olivat WHO:n, EU:n ja ESF/COST:in asiantuntijaryhmien jäseniä. He ovat osallistuneet jo yli 15 vuoden ajan erilaisiin yhteishankkeisiin.

Viime vuosien tutkimukset ovat vahvistaneet sen, että ainakin pääkaupunkiseudulla hiukkasten pitoisuudet ovat yhteydessä väestön kuolleisuuteen, riskiin saada sydäninfarkti ja siihen, että astma pahenee. Liikenne on todettu tärkeäksi haitallisten hiukkasten lähteeksi.

Toksikologinen, kemiallinen ja eri lähteiden tutkimus on osoittanut, että hiukkasten ominaisuuksissa on suuria eri vuodenaikoihin liittyviä vaihteluja. Suomalaiset tutkimukset ovat myös WHO-arvioinneissa osoittaneet, että varsin matalat pienhiukkasten ja ultrapienten hiukkasten pitoisuudet voivat vaikuttaa terveyteen merkittävästi, ainakin pohjoisilla alueilla.

Suomessa ei ole toistaiseksi tutkittu vuosia tai vuosikymmeniä kestäneen pienhiukkasille altistumisen vaikutuksia terveyteen. Se onkin hankalaa. Pienhiukkasten vuosipitoisuuksien erot ovat meillä suhteellisen pieniä paikkakuntien välillä ja niiden sisällä.





CAFE-hanke on tuonut esiin pienhiukkasten suuren merkityksen kansanterveydelle ja kansantaloudelle. Se on paljon suurempi kuin kaasumaisien epäpuhtauksien vaikutus. CAFE antaa kuitenkin hyvin karkean kuvan tästä ilmanlaadun ongelmasta. Syynä ovat tutkimuksen menetelmät ja vielä puutteellinen tieteellinen tieto.

Suomen asutus jakautuu hyvin epätasaisesti. Siksi CAFE-arviointi aliarvioi järjestelmällisesti yhdyskunnissamme paikallista altistumista pienhiukkasille.

CAFE-arvioinnin ja Euroopan komission ehdottaman ilmansuojelun strategian suurin ongelma on, että kaikki pienhiukkasten lähteet ja kemiallinen koostumus on arvioitu samanarvoisiksi. Nykyinen epidemiologinen tietämys viittaa järjestelmällisesti muuhun. Matalat noen, orgaanisten yhdisteiden ja metallien päästölähteet, kuten tieliikenne sekä hiilellä ja puulla toteutettava pienlämmitys, aiheuttavat lähistössä enemmän altistumista ja vaikuttavat terveyteen voimakkaammin kuin monet muut hiukkasten lähteet.

Toksikologinen tietämys tukee epidemiologian havaintoja siitä, että epätäydellinen palaminen tuottaa haitallisia hiiliyhdisteitä ja nokea. Se pitää sekundaarisia epäorgaanisia yhdisteitä, erityisesti ammoniumnitraattia, suhteellisen haitattomina. Sen vuoksi on erittäin vaikea uskoa, että runsas puolet EU-komission ilmansuojelun strategian terveydellisistä tavoitteista voitaisiin saavuttaa siten, että vähennetään $PM_{2,5}$:n ammoniumnitraattia. Terveystietämyksen perusteella tuntuisi oikeammalta yrittää vähentää enemmän matalista lähteistä tulevia epätäydellisen palamisen päästöjä. Niillä on huomattavia vaikutuksia sekä paikalliseen ilmanlaatuun että kaukokulkeumaan. Nykyisin perustein laskettu päästöjen vähennysten kohdentaminen ja arvioidut terveydelliset hyödyt saattavat olla pahasti virheellisiä.

Tietoa puuttuu

Yhdyskuntailman aerosolihiukkaset ovat hyvin mutkikas, alati vaihteleva seos. Se muuttuu kaiken aikaa yhdessä ja samassa paikassakin. Tähän vaikuttavat muun muassa päästölähteiden aktiivisuus, samaan aikaan vaikuttavat kaasumaiset aineet, vuodenaika, viikonpäivä, vuorokaudenaika ja sää.

Ihmisen ja luonnon tuottamat hiukkaset esiintyvät useassa kokoluokassa. Ne koostuvat tuhansista erilaisen kemiallisen koostumusten omaavista yhdisteistä, jotka ovat orgaanisia ja epäorgaanisia. Osa näistä yh-

disteistä on hyvin vesiliukoisia, toiset taas rasvaliukoisia tai liukenemattomia. Siksi onkin oikeutettua ajatella, että kaikki hiukkaset eivät voi vaikuttaa terveyteen samalla tapaa.

Lähiaikojen tutkimushankkeiden on pyrittävä tunnistamaan niitä lähteitä ja hiukkaskoostumuksia, jotka ovat eniten ja vähiten haitallisia terveydelle. Näin pystytään parhaiten vähentämään nykyisen tietämyksen epävarmuuksia ja kehittämään EU:n ilmansuojelun strategiaa. Mukaan on saatava lisäksi tietoa siitä, mitä terveydellisiä hyötyjä sääntely tuottaa. Euroopasta tarvitaan lisää tietoa myös pitkäaikaisen pienhiukkasille altistumisen aiheuttamista terveydellisistä vaikutuksista.

Uuden tiedon hankinnassa ovat keskeisessä asemassa monitieteiset tutkimushankkeet. Ne selvittävät samanaikaisesti pienhiukkasten lähteitä ja kemiallista koostumusta, niille altistumista sekä niiden epidemiologisia ja toksikologisia terveysvaikutuksia. Hankkeiden pitäisi kohdistua ihmisten altistumisen kannalta merkittäviin päästölähteisiin, kuten esimerkiksi puun pienpolttoon ja liikenteeseen. Tällaisia asetelmaltaan vahvoja tutkimuksia on tehty hyvin vähän.

On tutkittava, miten ulkoilman pienhiukkaset vaikuttavat useisiin herkkiin väestöryhmiin, kuten lapsiin sekä hengitys- ja sydänsairauksia sairastaviin, myös sisätiloissa. Samoin on selvitettävä tarkemmin terveyteen vaikuttavia muita tekijöitä Euroopan eri osissa, esimerkiksi perintötekijöiden ja ilmaston osuutta.

Uusien WHO-ohjeiden myötä EU:n tulisi myös seurata USEPA:n viitoittamaa tietä. Siinä väestöjen pitkän ajan altistuminen vähenee, kun kaikkialla alennetaan $PM_{2,5}$:n pitoisuuden vuosikeskiarvoa. Samalla voitaisiin vähentää lyhyen aikaa vallitsevaa huonoa ilmanlaatua. Se liittyy useimmiten mataliin lähipäästöjen lähteisiin. Vähennys toteutuu alentamalla kaupunkimaisilla alueilla $PM_{2,5}$:n vuorokautisia pitoisuuksia.

USEPA ehdottaa myös karkeiden hengitettävien hiukkasten ($PM_{10-2,5}$; halkaisija 2,5-10 μm) vuorokautisten pitoisuuksien sääntelemistä $PM_{2,5}$ -hiukkaspitoisuuksien ohella. Ehdotus edistää hyvin katupölyn ja muun karkeamman hiukkasainekseen päästöjen vähentämistä.

$PM_{10-2,5}$:n sääntely onkin parempi kuin nykyisin yleisesti käytetty kaikkien hengitettävien hiukkasten (PM_{10} ; halkaisija < 10 μm) sääntely. PM_{10} :ssä kaikki pienhiukkasten ja karkeiden hengitettävien hiukkasten lähteet sekoittuvat, eikä minkäänlaisten toimien vaikutus tule mittaauksissa hyvin esiin.



Lehtikuva/Jussi Nukari

Tietämys terveysvaikutuksista tuo uusia tekniikoita

Hiukkasmaisille saasteille altistumista ja terveysvaikutuksia koskeva tutkimus tukee koko EU:n alueen ilmansuojelun strategiaa. Soveltamalla lisääntyvää tietämystä käytäntöön voidaan tehdä merkittäviä uusia aluevaltuuksia. Tämä pätee niin päästöjä vähentäviin tekniikoihin kuin hiukkaspitoisuuksien tai hiukkasten koostumuksen mittaustekniikoihin. Päästöjen vähentämisen ohella väestön saamaa altistumista voidaan pienentää myös muilla teknisillä keinoilla. Sellaisia ovat esimerkiksi rakennuksiin ja ajoneuvoihin tulevan ulkoilman tehokas suodatus, liikennesuunnittelu ja kaavoitus.

FINE-tekniologiaohjelman tulokset edistävät myös liiketoimintaa. PAMCHAR-hanke (s. 24) tarjoaa uusia kokeellisia sovelluksia. Pienhiukkasten päästöjen myrkyllisyyttä voidaan arvioida monipuolisesti eri aloilla, mukaan lukien biopoltoaineet ja niiden polttotekniikat sekä ajoneuvot, prosessiteollisuus ja energiantuotanto. Solututkimukset voivat täydentää perinteisten päästömittausten tuloksia. Ne voivat auttaa uusien, haitallisia päästöjä vähentävien tekniikoiden kehittämisessä.

HIPPU-hankkeessa (s. 25) kehitetty monitieteinen tutkimusasetelma voi auttaa mittaamaan, miten ison teollisuuslaitoksen luvanvaraiset tai muun laitoksen

hiukkaspäästöt vaikuttavat lähiyhdyskunnassa väestön altistumiseen ja terveyteen. Sen avulla voidaan verrata tällaisen laitoksen vaikutuksia muihin paikallisiin ja alueellisiin lähteisiin. Lisäksi voidaan auttaa valitsemaan päästöjä vähentäviä tekniikoita silloin, kun päästöt koskevat määräykset kiristyvät.

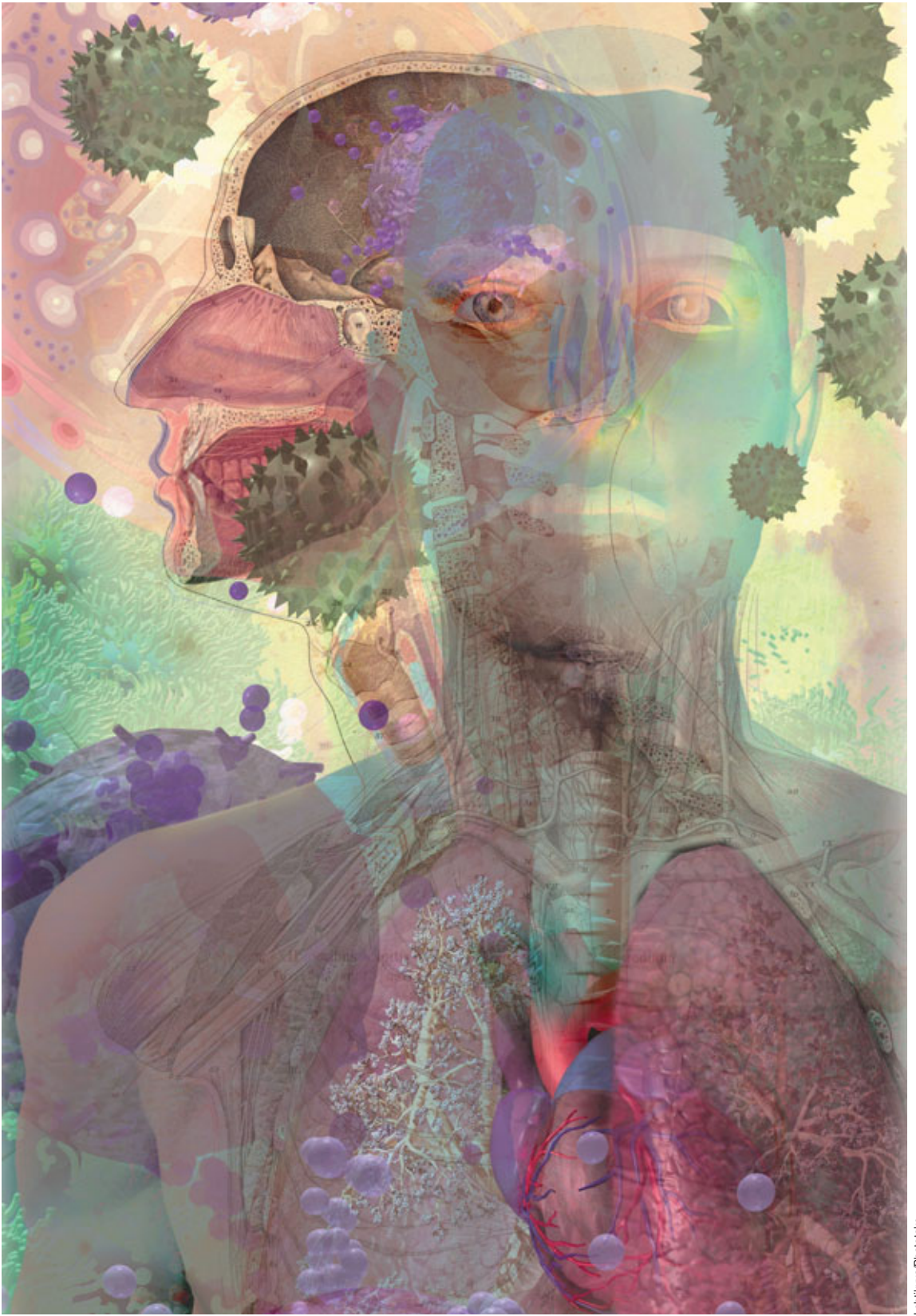
ExFine-hankkeen (s. 24) menetelmät soveltuvat hyvin esimerkiksi hankkeisiin, joissa kehitetään kotien ja työpaikkojen sisätilojen ja liikennevälineiden ilmanvaihtoa ja ilmansuodatusta. Mittalaitteiden avulla voidaan osoittaa, miten uudet tekniset ratkaisut vaikuttavat henkilökohtaiseen altistumiseen pienhiukkasille.

KOPRA-hankkeessa (s. 23) kehitettyä yhdenmättyä mallia pienhiukkasten lähteistä ja terveydellisistä vaikutuksista voidaan käyttää eri hankkeiden ympäristövaikutusten arvioinnissa. Mallia voidaan hyödyntää myös, kun halutaan arvioida eri lähteistä tulevien päästöjen vähentämisestä koituvia nettohyötyjä ja -kuluja.

Kaikkiaan Suomen monitieteisestä hiukkastutkimuksesta, mukaan lukien altistumis- ja terveystutkimus, orastaa monenlaisia mahdollisuuksia hyödyntää tuloksia kaupallisesti suoraan tai epäsuorasti. Tämän lisäksi laadukas tutkimus voi vaikuttaa eurooppalaiseen ilmanlaatua ja päästöjä koskeviin säännöksiin.



1. CAFE. Ilmansuojelu 2005;29(4):9-31.
2. Commission staff working paper SEC (2005) 1133 – annex to the Communication on Thematic Strategy on Air Pollution and the Directive on “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe”. European Commission: Brussels, 2005. Internet: http://ec.europa.eu/environment/air/cafe/pdf/ia_report_en050921_final.pdf
3. Dockery DW, Pope CA III, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG, Speizer FA. An association between air pollution and mortality in six US cities. *N Engl J Med* 1993;329:1753-1759.
4. EXPOLIS – tietopaketti altistumisesta. *Ilmansuojelu* 2004;28(2):12–42.
5. Jantunen M, Komulainen H, Nevalainen A, Tuomisto J, Venäläinen R, Viluksela M. Selvitys elinympäristön kemikaaliriskeistä – Kansallisen kemikaaliohjelman taustaselvitys. *Kansanterveyslaitoksen julkaisuja B11 / 2005*.
6. Pekkanen J. Kaupunki-ilman pienhiukkasten terveysvaikutukset. *Duodecim* 2004;120:1645–1652.
7. Pope CA III, Dockery DW. Health effects of fine particulate air pollution – lines that connect. *J Air Waste Manage Assoc* 2006;56:709-742.
8. Salonen RO (toim). Multidisciplinary research on urban air particles in Finland. *Scand J Work Environ Health* 2004;30 suppl 2:1-98.
9. Salonen RO. Puun pienpolton terveyshaitat. *Ympäristö ja Terveys* 2004; 35(4): 4-9.
10. Sarkkinen S, Lumme E, Salonen RO, Säynätkari T. Ilmanlaadun ohjearvotyöryhmän mietintö. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto: Työryhmän mietintö 1993;72.
11. Watkiss P, Pye S, Holland M. CAFE CBA: Baseline analysis 2000 to 2020. Report AEAT/ED51014/ Baseline Issue 5. AEA Technology Environment: Oxon, United Kingdom, 2005. http://europa.eu.int/comm/environment/air/cafe/activities/pdf/cba_baseline_results_2000_2020.pdf.
12. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Air quality criteria for particulate matter. Publication EPA/600/P-99/002aF. Research Triangle Park, NC. USEPA Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment – RTP Office, 2004.
13. World Health Organization (WHO). Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series, No. 23. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 1987.
14. World Health Organization (WHO). WHO Working Group on “Classical” Air Pollutants. Update and revision of the air quality guidelines for Europe. Report EUR/ICP/EHAZ 94 05/PB01 of Working Group on “Classical” Air Pollutants, 11-14 October 1994, Bilthoven, NL. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 1995 (EUR/HFA target 21).
15. World Health Organization (WHO). Air Quality Guidelines for Europe. 2nd edition. WHO Regional Publications, European Series, No. 91. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2000.
16. World Health Organization (WHO). Health aspects of air pollution. Results from the WHO project “Systematic Review of Health Aspects of Air Pollution in Europe”. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2004.
17. World Health Organization (WHO). WHO air quality guidelines global update 2005. Report WHOLIS E87950 of Working Group Meeting, Bonn, Germany, 18-20 October 2005. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2005. Internet: <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>.
18. Ympäristöterveystoimikunta. Suomen kansallinen ympäristöterveysohjelma. Sosiaali- ja terveysministeriö ja Ympäristöministeriö: Helsinki. Komiteamietintö 1997;8.
19. Internet-linkkejä ja oppaita
 - ilmansuojelu: <http://www.ymparisto.fi/>
 - epäpuhtauksien päästöt ilmaan: <http://www.ymparisto.fi/>
 - ilmakehän hiukkasten tutkimus: <http://www.fmi.fi/ilmanlaatu/>
 - pääkaupunkiseudun ilmanlaatumittaukset: <http://www.ytv.fi/FIN/ilmanlaatu/>
 - tietoa ilmansaasteiden terveystutkimuksesta: http://www.ktl.fi/portal/suomi/osiot/tietoa_terveydesta/elinymparisto/ilma/
 - tietoa hengityssairaille ilmansaasteista, mm. yleistajuisia oppaita ilmansuojelusta, hiukkasista ja terveydestä (pdf): <http://www.hengitysliitto.fi/>
 - EU:n CAFE-ohjelman raportit: <http://ec.europa.eu/environment/air/cafe/>
 - WHO:n ilmanlaatu ja terveyttä koskevat sivut: <http://www.euro.who.int/eprise/main/WHO/Progs/AIQ/Home/>



Lyhenteitä ja määritelmiä



Alahengitystiet	Henkitorvi, keuhkoputket ja keuhkorakkulat
As	Arseeni
Astma	Keuhkoputkia ahtauttava allerginen tai ei-allerginen tulehdussairaus
CAFE	Clean Air For Europe – Puhdasta ilmaa Euroopalle -ohjelma
Cd	Kadmium
CO	Hiilimonoksidi
DNA	Deoksiribonukleiinihappo; perimän sisältävä tuman molekyyli
EAKR	Euroopan aluekehitysrahasto
Epidemiologia	Tieteenala, joka tutkii väestön sairauksia ja muita terveyteen vaikuttavia syitä ja niiden esiintymiseen vaikuttavia tekijöitä
COST	Euroopan tiedesäätiön hallinnoima tieteellisen ja teknisen tutkimuksen yhteistyöohjelma
EU	Euroopan Unioni
EU25	Nykyiset 25 Euroopan Unionin jäsenvaltiota
FINE	Pienhiukkasten teknologiaohjelma
Keuhkohtaumatauti	Pääasiassa tupakoinnin aiheuttama keuhkosairaus, jossa keuhkojen rakenne tuhoutuu ja keuhkoputket ahtautuvat
Keuhkorakkulat	Keuhkojen ääreisosien ohutseinäiset rakenteet, joissa tapahtuu kaasujen vaihto hengitysilman ja verenkierron välillä
Kynnysarvo	Pitoisuus, jonka ylittyminen velvoittaa tiedottamiseen tai muihin toimiin
Levoglukosaani	Biomassan epätäydellisessä palamisessa syntyvä selluloosan pyrolyysituote
Massapitoisuus	Hiukkasten tai muun epäpuhtauden massa kuutiometrissä ilmaa
µm	Mikrometri; millimetrin tuhannesosa
µg	Mikrogramma; milligramman tuhannesosa
ng	Nanogramma; milligramman miljoonasosa
µg/m³	Mikrogrammaa kuutiometrissä ilmaa
Ni	Nikkeli
NO₂	Typpidioksidi
NO_x	Typen oksidit; typpidioksidi + typpimonoksidi
Ohjearvo	Ilmansuojelua ja yhdyskuntien suunnittelua ohjaava ilman epäpuhtauden pitoisuus
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt
PM₁₀	Hengitettävien hiukkasten massapitoisuus (halkaisija <10 mikrometriä)
PM_{2.5}	Pienhiukkasten massapitoisuus (halkaisija <2,5 mikrometriä)
PM_{10-2.5}	Karkeiden hengitettävien hiukkasten massapitoisuus (halkaisija 2,5 – 10 mikrometriä)
Pb	Lyijy
Raja-arvo	Viranomaisia sitova suurin hyväksyttävä ilman epäpuhtauden pitoisuus
SO₂	Rikkidioksidi
Tavoitearvo	Pitoisuus, joka on alitettava mahdollisuuksien mukaan määrättyssä ajassa
Toksikologia	Tieteenala, joka tutkii myrkyjä, niiden havaitsemista ja vaikutuksia sekä vaikutusten hoitoa
USEPA	Yhdysvaltojen ympäristövirasto
Vna	Valtioneuvoston asetus
Vnp	Valtioneuvoston päätös
WHO	Maailman terveysjärjestö
Ylähengitystiet	Nenä, nenän sivuontelot ja nielu
YTV	Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta

Tekes – rahoitusta ja asiantuntemusta

Tekes on tutkimus- ja kehitystyön ja innovaatiotoiminnan rahoittaja ja asiantuntija. Tekesin toiminta auttaa yrityksiä, tutkimuslaitoksia, yliopistoja ja korkeakouluja luomaan uutta tietoa ja osaamista ja lisäämään verkottumista. Tekes jakaa rahoituksellaan teollisuuden ja palvelualojen tutkimus- ja kehitystyön riskejä. Toiminnallaan Tekes vaikuttaa liiketoiminnan kehittymiseen, elinkeinoelämän uudistumiseen, kansantalouden kasvuun, työllisyyden vahvistumiseen ja yhteiskunnan hyvinvointiin. Tekesillä on vuosittain käytettävissä avustuksina ja lainoina runsaat 400 miljoonaa euroa tutkimus- ja kehitysprojektien rahoitukseen.

Teknologiahjelmat – Tekesin valintoja suomalaisen osaamisen kehittämiseksi

Tekesin teknologiaohjelmat ovat laajoja monivuotisia kokonaisuuksia, jotka on suunnattu elinkeinoelämän ja yhteiskunnan tulevaisuuden kannalta tärkeille alueille. Teknologiahjelmilla luodaan uutta osaamista ja yhteistyöverkostoja. Ohjelmien aiheiden valinnat perustuvat Tekesin strategian sisältölinjauksiin. Tekes ohjaa noin puolet yrityksille, yliopistoille, korkeakouluille ja tutkimuslaitoksille myöntämästään rahoituksesta teknologiaohjelmien kautta.



FINE

Hengitämme joka päivä hyvin pieniä hiukkasia. Tutkimusten mukaan ne ovat terveydelle haitallisia. Pienhiukkaset aiheuttavat vuosittain yli 300 000 ihmisen ennaltaehkäisen kuoleman Euroopassa. Pienhiukkasia on ilmassa yhä enemmän mm. liikenteen ja energiankäytön lisääntyessä. Uusien tekniikoiden avulla pienimmätkin hiukkaset voidaan havaita aiempaa paremmin. Samalla tieto pienhiukkasten vaikutuksista terveytemme on lisääntynyt.

Tekes käynnisti vuonna 2002 yhdessä Suomen Akatemian, liikenne- ja viestintäministeriön sekä ympäristöministeriön kanssa nelivuotisen FINE-teknologiaohjelman. Ohjelmassa keskityttiin pienhiukkasten päästöihin ja vaikutuksiin sekä niiden havaitsemiseen ja vähentämiseen viidellä osa-alueella – energiantuotanto ja teollisuus, liikenne ja liikennevälineet, mittaminen ja mittalaitteet, sisäilma sekä terveys ja ympäristökysymykset. Ohjelmassa toteutettiin kaikkiaan 53 projektia lähes 60 yrityksen ja yli 20 tutkimustahon voimin.

Ohjelman kaikilta viideltä osa-alueelta on tuotettu yhteenvetoraportit. Tämä raportti muodostaa yhteenvedon FINEn terveysprojektien tuloksista ja ilmanlaadun terveysvaikutustietämyksestä sekä ilmanlaadun säädösten kehittymisestä. Raportti myös viitoittaa tulevaisuuden tutkimus- ja kehitystarpeita.

Tekes eli Teknologian kehittämiskeskus on merkittävin sovelletun tutkimus- ja kehitystyön ja teollisuuden innovaatio toiminnan julkinen rahoittaja Suomessa. Lisätiedot www.tekes.fi.

ISBN 952-457-250-8