

# Hajautetun energiantuotannon vaikutus väestön altistumiseen pienhiukkasille

**Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Kaarle Kupiainen,  
Ville-Veikko Paunu, Olli Sippula, Jorma Jokiniemi**





SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN  
RAPORTTEJA 30 | 2009

# Hajautetun energiantuotannon vaikutus väestön altistumiseen pienhiukkasille

**Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Kaarle Kupiainen,  
Ville-Veikko Paunu, Olli Sippula, Jorma Jokiniemi**

Helsinki 2009

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS



S Y K E

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA 30 | 2009  
Suomen ympäristökeskus  
Tutkimusosasto

Taitto: Seija Turunen  
Kansikuva: Ari Andersin / Ympäristöhallinnon kuvapankki

Julkaisu on saatavana myös internetistä:  
[www.ymparisto.fi/julkaisut](http://www.ymparisto.fi/julkaisut)

Edita Prima Oy, Helsinki 2010

ISBN 978-952-11-3680-1 (nid.)  
ISBN 978-952-11-3681-8 (PDF)  
ISSN 1796-1718 (pain.)  
ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

## ALKUSANAT

Tutkimushanke "Hajautetun energiantuotannon vaikutus väestön altistumiseen pienhiukkasille (HEVA)" suoritettiin Suomen ympäristökeskuksen Globaalimuutoksen tutkimusohjelmassa yhteistyössä Kuopion yliopiston kanssa. Työn tavoitteena oli selvittää aiemmin huonosti tunnettuja pienten polttolaitosten hiukkaspäästöjä ja niiden merkitystä hengitysilman pitoisuuksiin, sekä jatkaa työkaluna käytetyn Suomen alueellisen päästöskenaariomallin (FRES) kehittämistä. Tekijät kiittävät hankkeen rahoittajia: Energiateollisuus ry:n koordinoimaa Ympäristöpoolia sekä Ympäristöministeriötä. Lisäksi haluamme kiittää Matti Nuutilaa (Energiateollisuus ry), Mia Wallénia (Energiateollisuus ry), Timo Ahosta (Fortum Oyj), Seppo Sarkkista (Ympäristöministeriö), Anna Häyristä (Helsingin Energia) sekä Harri Pietarilaa ja Birgitta Alaviippolaa (Ilmatieteenlaitos) arvokkaista neuvoista projektin aikana.



## SISÄLLYS

<b>1 Johdanto</b> .....	7
<b>2 Pienhiukkaspäästöt Suomessa</b> .....	8
2.1 Päästölähteet .....	8
2.2 Hiukkasten muodostuminen polttoprosessissa .....	9
2.3 Pienet polttolaitokset Suomessa .....	10
2.4 Päästöjen leviäminen ja vaikutus lähialueen ilmanlaatuun .....	10
<b>3 Puun ja turpeen merkitys Suomen energiantuotannossa</b> .....	12
<b>4 Hiukkaspäästöjen vähentäminen</b> .....	14
<b>5 Metodit</b> .....	16
5.1 PM <sub>2,5</sub> -päästöt .....	16
5.2 Pitoisuudet ja väestöaltistus .....	18
5.3 Kattilakannan rajaus ja skenaarioissa käytetyt oletukset .....	18
5.3.1 Polttoaineenkäytön kehitys .....	19
5.3.2 Kattilakannan muutokset .....	19
5.3.3 Oletukset hiukkaserottimille .....	19
<b>6 Pienten polttolaitosten päästöt ja väestöaltistus vuonna 2020</b> .....	21
6.1 Päästömäärät ja savukaasunpuhdistuksen kustannukset .....	21
6.2 Päästöjen vaikutus pitoisuuksiin ja väestöaltistukseen .....	22
<b>7 Tulosten tarkastelu</b> .....	25
7.1 Päästöt ja vähennyskustannukset .....	25
7.2 Pitoisuudet ja väestöaltistus .....	26
7.2.1 Vertailu suurten pistelähteiden vaikutuksiin .....	26
7.2.2 Vertailu puun pienpolton vaikutuksiin .....	27
<b>8 Johtopäätökset</b> .....	28
<b>Lähteet</b> .....	29
<b>Kuvailulehti</b> .....	31
<b>Presentationsblad</b> .....	32
<b>Documentation page</b> .....	33





# 1 Johdanto

Yhdyskuntailman hengitettävät pienhiukkaset ovat vakava ympäristöongelma, jonka aiheuttamat taloudelliset ja kansanterveydelliset haitat ovat merkittäviä. Pitkäaikainen altistuminen hiukkasille voi aiheuttaa elimistössä pysyviä vaurioita, jotka pahimmillaan saattavat johtaa ennenaikaiseen kuolemaan. Pienhiukkasten haitallisuus riippuu niiden kemiasta ja ennen kaikkea hiukkaskoosta, joka määrää niiden kulkeutumisen elimistössä.

Yksi merkittävistä ihmisen aiheuttamista pienhiukkasten syntylähteistä on energiantuotannon polttoprosessit. Energialaitosten savukaasunpuhdistukseen on viime vuosikymmeninä kiinnitetty paljon huomiota, mutta yhtenäiset päästörajat koskevat vain yli 50 MW:n laitoksia (esim. LCP-direktiivi, 2001/80/EC). Pienempien laitosten päästöjä säädellään paikallisten ympäristölupaviranomaisten myöntämillä ympäristöluvilla, joiden vaatimustaso saattaa vaihdella. Tästä syystä niiden tarkat hiukkaspäästöt tunnetaan huonosti, ja väljempien päästörajojen vuoksi näissä laitoksissa on oletettu olevan potentiaalia huomattaville vähennyksille hiukkaspäästöissä. Bioenergian käyttöpaineiden kasvaessa lisääntyy myös hajautetun energiantuotannon merkitys, jolloin pienten laitosten päästöt korostuvat.

Hiukkaspäästöjä syntyy eniten poltettaessa kiinteitä polttoaineita, johtuen niiden korkeasta tuhkapitoisuudesta. Lisäksi ne saattavat palavaa epätäydellisesti, jolloin muodostuu kaasumaisia hiilivetyjä ja nokea. Puu ja turve ovat pienten laitosten merkittävimmät kiinteät polttoaineet Suomessa. Ne ovat myös kotimaisia uusiutuvia tai hitaasti uusiutuvia polttoaineita, joiden käytölle tulee olemaan kasvavaa kysyntää tulevaisuudessa. Tämän työn tarkoituksena on arvioida alle 50 MW:n puu- ja turvepolttoisten laitosten pienhiukkaspäästöjen vähennyspotentiaalia ja kustannuksia Suomessa. Lisäksi vastaava selvitys tehtiin vertailun vuoksi saman kokoluokan raskasöljykattiloille, jotka eivät ole pelkästään vara- tai huippuvoimakäytössä.

Päästövähennyksiä, niiden kustannuksia ja vaikutuksia hengitysilman hiukkaspitoisuuksiin arvioitiin eri skenaarioissa vuodelle 2020. Skenaarioita on puupolttoaineen saatavuuden mukaan kaksi, joissa molemmissa on kolme vaihtoehtoa käytettävälle savukaasunpuhdistustekniikalle. Laskelmat pohjautuvat FRES-mallin kattilakohtaiseen päästö- ja tekniikkarekisteriin, jonka avulla uusien hiukkaserottimien vaikutukset yksittäisiin laitoksiin on arvioitu. Lopuksi primäärihiukkaspäästöjen aiheuttamat taustapitoisuudet ilmassa laskettiin käyttäen leviämismatriiseja.

## 2 Pienhiukkaspäästöt Suomessa

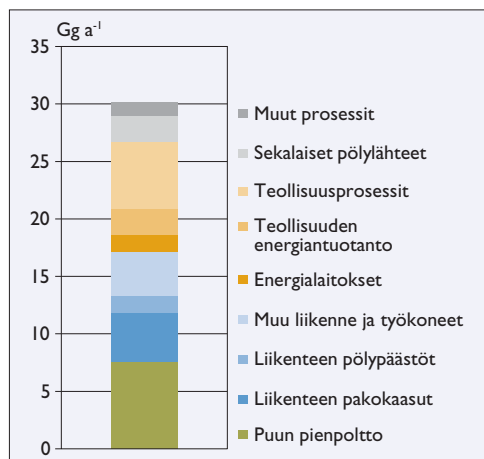
Hengitysilman pienhiukkasia pidetään länsimaissa haitallisimpina ympäristötekijöinä ihmisen terveydelle (CAFE 2005). Vaikka Suomen pienhiukkastasot ovat Euroopan alhaisimpia, aiheuttavat meidänkin päästömme vuosittain satojen ihmisen ennenaikaisen kuoleman (Kukkonen ym. 2007). Tämä siitäkin huolimatta, että yhdyskuntien ilma on viime vuosikymmeninä puhdistunut huomattavasti teknisten innovaatioiden myötä.

### 2.1

#### Päästölähteet

Pienhiukkaspäästöt syntyvät pääosin liikenteestä, puun pienpoltosta, energiantuotannosta ja teollisuuden polttoprosesseista. Lisäksi ihmisen toiminnasta aiheutuu monenlaisia karkeampia hiukkaspäästöjä, kuten katu- ja maansiirtopölyä sekä rakentamisesta ja materiaalinkäsittelystä syntyviä hiukkasia. Luonnollisia hiukkaslähteitä ovat esimerkiksi metsäpalot, maaperän pöly ja meren roiskeiden aerosolit. Kuvassa 1 on esitetty pienhiukkasten ihmisperäiset päästölähteet Suomessa vuonna 2000 ja taulukossa 1 erilaisista lähteistä syntyvien hiukkasten kokojakaumaa.

Ilmakehän hiukkaset voivat olla primääri- tai sekundäärihiukkasia, jotka molemmat tulevat pääosin ihmisperäisistä lähteistä. Primäärihiukkaset ovat paikallisista päästölähteistä suoraan ilmaan pääseviä hiukkasia, joka energiantuotannon tapauksessa tarkoittaa polttoaineen sisältämän tuhkan muodostamia epäorgaanisia hiukkasia, sekä lisäksi epätäydellisen palamisen seurauksena syntyviä orgaanisia yhdisteitä ja nokea. Kaasumaisista epäpuhtauksista ilmakehässä syntyneitä hiukkasia kutsutaan sekundäärihiukkasiksi. Primäärihiukkasten oletetaan olevan sekundäärihiukkasia haitallisempia terveydelle (Tuomisto ym. 2008), jolloin paikallisten, erityisesti lähellä maanpintaa tapahtuvien päästöjen merkitys korostuu tarkasteltaessa altistumisen terveysvaikutuksia.



Kuva 1. Päästölähteet primäärisille PM2.5-hiukkasille Suomessa vuonna 2000 (Karvosenoja 2008)

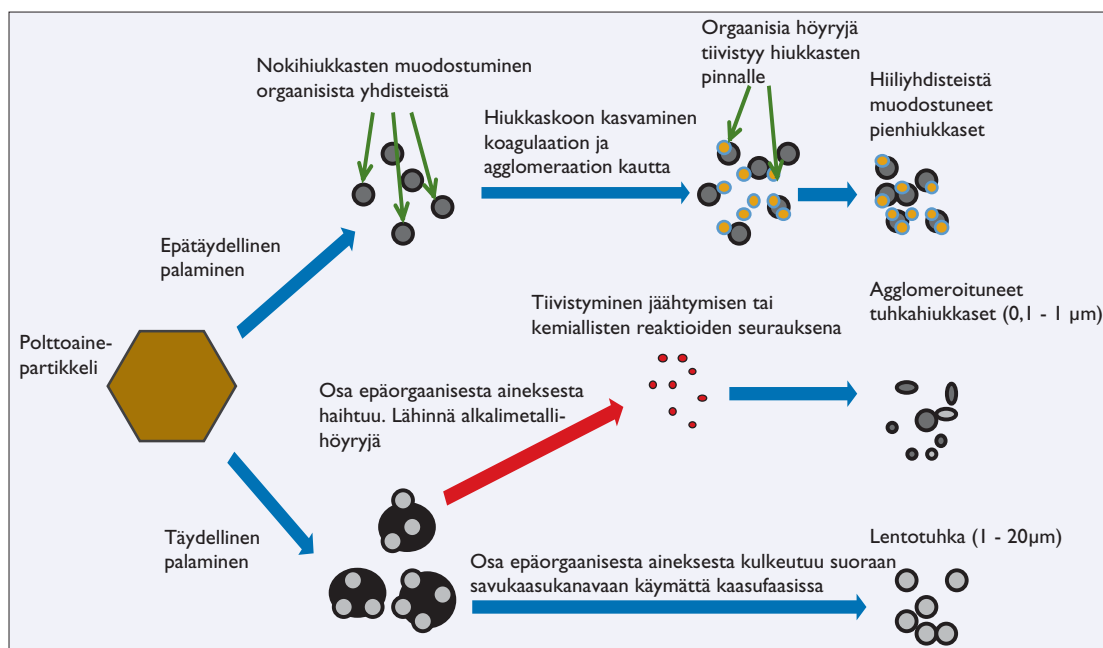
Taulukko 1. Ihmisen ja luonnon ilmakehään tuottamat hiukkaset (Salonen & Pennanen 2006)

Hiukkasten koko	Ihmisen toiminnasta syntyvät hiukkaset	Luonnossa syntyvät hiukkaset
Karkeat hengitettävät hiukkaset (2.5-10 µm)	Liikenteen jarru-, rengas- ja nastapöly, asfalttipöly Hiekoitushiekan ja tiesuolan pöly Maansiirtopöly Teollisuuden, energiantuotannon, satamien jne. materiaalikäsittely	Tuulen kuljettama hiekkapöly Merisuola Kasvijäänteiden, 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 purkauksen nokipäästöt ja kaasupäästöistä muodostuvat orgaaniset ja epäorgaaniset hiukkaset Puiden ja muun kasvillisuuden hiilivetyypäästöistä muodostuvat orgaaniset hiukkaset

## 2.2

### Hiukkasten muodostuminen polttoprosessissa

Poltossa primäärihiukkasia muodostuu polttoaineen tuhkasta ja palamatta jääneestä hiilestä (Johansson 2002). Polttolaitoskokuoluokassa palaminen on pääsääntöisesti niin tehokasta, että suurin osa hiukkasista on polttoaineen sisältämää epäorgaanista ainesta. Mineraalit vapautuvat orgaanisen aineen palaessa niiden ympäriltä, tai ne voivat höyrystyä, jolloin ne alkavat muodostaa pienhiukkasia savukaasun jäähtyessä tai kemiallisten reaktioiden seurauksena. Syntyvien hiukkasten määrä, kemiallinen koostumus ja koko vaihtelevat merkittävästi, riippuen polttoaineen tuhkan kemiasta (Sippula ym. 2009), ja seospoltossa voi tuhkan muodostus osalla polttoaineista erota tilanteesta, jossa niitä poltetaan yksinään (Kouvo 2003). Kiinteiden polttoaineiden poltossa suurin osa polttoaineen tuhkasta poistetaan kattilasta pohjatuhkana, eikä se kulkeudu savukaasukanavaan ja hiukkaserottimiin asti. Biomassojen poltossa pienhiukkaset muodostuvat pääosin alkalimetallien (K, Na) suoloista palamisprosessin ollessa tehokas (Sippula ym. 2009). Huonoissa palamisolosuhteissa pienhiukkasissa voi olla suuria määriä hiiltä, kun polttoaineesta vapautuneita orgaanisia höyryjä sekä liekissä muodostuvaa nokea jää palamatta. Orgaaniset höyryt tiivistyvät noki- ja tuhka hiukkasten pinnalle savukaasun jäähtyessä (Johansson 2002). Kuvassa 2 on esitetty hiukkasten muodostumisen reitit.



Kuva 2. Hiukkasten muodostuminen biomassan poltossa (Lighty ym. 2000, Sippula ym. 2009)

## Pienet polttolaitokset Suomessa

Pienistä ja keskisuurista polttolaitoksista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä kokoluokkaa ~1-50 MW. Ne ovat useimmiten pelkkää lämpöä tai höyryä tuottavia lämpö-/höyrykeskuksia, mutta voivat olla myös vastapainevoimalaitoksia, joissa tuotetaan lämmön tai höyryn lisäksi sähköä. Pelkkää sähköä tuottavat lauhdevoimalaitokset eivät ole kokoluokalle tyypillisiä. Mainitun kokoluokan energialaitoksille käytetään tässä työssä nimitystä pienet polttolaitokset.

Vuoden 2005 polttoaineenkulutus Suomen energiantuotantolaitoksissa oli noin 642 PJ, josta reilu 8 % poltettiin pienissä puu-, turve- tai raskasöljykäyttöisissä laitoksissa. Lukumääräisesti näitä kattiloita oli toiminnassa noin 1450 ja yli 50 MW:n kattiloita noin 130. Alle 50 MW:n kattiloista kuitenkin suurin osa on vara- ja huippuvoimayksiköitä, jotka eivät ole ympärivuotisessa käytössä.

Vaikka suurin osa polttoaineiden kulutuksesta tapahtuu teholtaan yli 50 MW:n laitoksissa, on niissä myös pääsääntöisesti huomattavasti tehokkaammat savukaasunpuhdistusjärjestelmät, jolloin päästöt tuotettua energiamäärää kohti ovat alhaiset. Pienten laitosten kohdalla potentiaali päästöjen vähentämiseen on suurempi, koska niissä ei tavallisesti ole vaadittu yhtä pitkälle vietyjä erotusmenetelmiä viranomaisten asettamien rajojen puolesta.

Tarkastellut pienen kokoluokan puu- ja turvekattilat käyttivät vuonna 2005 vain 5 % energiantuotantosektorin polttoaineesta, mutta tuottivat yli 15 % sen pienhiukkaspäästöistä. Tämä osoittaa pienten polttolaitosten savukaasunpuhdistuksen olevan selkeästi heikommalla tasolla kuin yli 50 MW:n voimalaitosten, jolloin potentiaalia päästöjen vähentämiseen on olemassa. Laitosten keskimääräiset TSP-päästöt hiukkaserottimien jälkeen olivat 90 mg/MJ, kun rajat uusille, 50–100 MW:n laitoksille ovat LCP-direktiivissä (2001/80/EC) 20 mg/MJ. LCP-direktiiviä ollaan uudistamassa, jonka myötä rajat tulevat tiukentumaan entisestään ja saattavat ulottua myös alle 50 MW:n laitoksiin.

Raskasöljykattiloiden keskimääräiset TSP-päästöt olivat noin 50 mg/MJ. Luku on vain puolta pienempi kuin kiinteän polttoaineen kattiloissa, mutta on huomattava, että yli 80 % öljykattiloista oli vailla minkäänlaista hiukkaserotinta. Öljyn poltossa syntyvien hiukkasten määrä on siis selvästi pienempi kuin puulla tai turpeella.

## Päästöjen leviäminen ja vaikutus lähialueen ilmanlaatuun

Piipunkorkeudella on tärkeä rooli päästöjen vaikutukseen laitoksen lähialueen pitoisuuksiin. Maanpinnan korkeusvaihteluiden ja lähellä sijaitsevien korkeiden rakennusten sekä meteorologisten leviämisolosuhteiden vaihtelun vaikutusta piipunkorkeuden mitoitukseen on tutkittu Ilmatieteenlaitoksen selvityksessä (Alaviippola 2008). Piipunkorkeuden mitoitus tehdään eri polttoaineilla sen päästökomponentin mukaan, jolla on suurin vaikutus paikallisen ilmanlaadun vuorokausiohjearvojen saavuttamisessa. Puulla se tarkoittaa pienhiukkasia ja turpeella sekä raskaalla polttoöljyllä rikkiä.

Epäedullisia leviämisolosuhteita voi muodostua monista syistä. Laaksomaisessa ympäristössä tai korkeiden rakennusten keskellä ilman sekoittuminen on heikkoa, eivätkä päästöt pääse laimenemaan. Jos laitosta ajetaan selkeästi optimitehoa alemmalla kuormalla, jää päästöjen mekaaninen nousulisä pienemmäksi, joka vaikeuttaa päästöjen leviämistä ja laimenemista. Lisäksi tuuliolosuhteiden vaihtelulla ja ilman lämpötilalla on merkittävä vaikutus senhetkisiin leviämisolosuhteisiin.

Alaviippolan (2008) selvityksessä mallinnettiin alueellisten ilmanlaatumallien avulla päästöjen aiheuttamia korkeimpia vuorokausipitoisuuksia 6 x 6 km alueen sisällä laitoksen ympäristössä. Laskelmat suoritettiin erikokoisille polttolaitoksille (5–50 MW) eri polttoaineilla ja piipunkorkeuksilla, käyttäen päästökertoimina suunnitteilla olevia pienten laitosten päästöraja-arvoja.

Tuloksena saadut korkeimmat pienhiukkasten vuorokausipitoisuudet vaihtelivat puulla, turpeella ja raskaalla polttoöljyllä välillä 0,1–5 µg/m<sup>3</sup>, riippuen laitoksen polttoainetehosta ja piipunkorkeudesta. Vastaavasti korkeimmat vuosikeskiarvopitoisuudet olivat keskimäärin 10 %:n luokkaa korkeimpiin vuorokausipitoisuuksiin nähden (Alaviippola henk.koht.tiedonanto 15.10.2009). Mallissa laitoksia ajettiin täydellä teholla ympäri vuoden, joten todellisuudessa vuosikeskiarvot olisivat suuruudeltaan huomattavasti alhaisempia kuin yllä esitetyt. Piipunkorkeuden vaikutus näkyi selvästi pitoisuuksissa. Kun piippua madallettiin 50 metristä 30 metriin, nousivat korkeimmat vuosikeskiarvot puulla ja turpeella noin kolminkertaisiksi. Toisaalta taas piipunkorkeuden merkitys väheni huomattavasti, kun se ylitti 50 metriä.

Tässä tutkimuksessa käytetty mallinnus kuvaa hiukkaspäästöjen vaikutusta vuosikeskiarvopitoisuuksiin 10 x 10 km alueresoluutiolla, jolloin pitoisuuden vaihtelua alueen sisällä ei näy tuloksista. Myöskään piipunkorkeuden laitoskohtainen vaihtelu ei vaikuta tuloksiin (malli olettaa savukaasujen lähes välittömän laimenemisen koko sekoituskorkeuteen). Toisin sanoen tämän tutkimuksen tulokset eivät kuvaa laitoksen välittömän lähiympäristön huippupitoisuuksia, eivätkä siten sovellu vertailuun ilmanlaadun ohjearvoihin. Sen sijaan ne kuvaavat päästöjen aiheuttamien taustapitoisuuksien vuosikeskiarvoja, ja soveltuvat päästöjen aiheuttaman väestöaltistuksen arviointiin.

### 3 Puun ja turpeen merkitys Suomen energiantuotannossa

Puu ja turve ovat merkittävimmät kiinteät polttoaineet Suomen pienissä polttolaitoksissa, ja niitä poltetaan tavallisesti keskenään samoissa kattiloissa, riippuen polttoaineiden saatavuuksista ja hinnoista. Puun käyttö ainoana polttoaineena on pienissä laitoksissa yleisempää kuin turpeen. Kotimaisuus ja puun kohdalla uusiutuvuus aiheuttavat näiden käytölle kasvupaineita tulevaisuudessa.

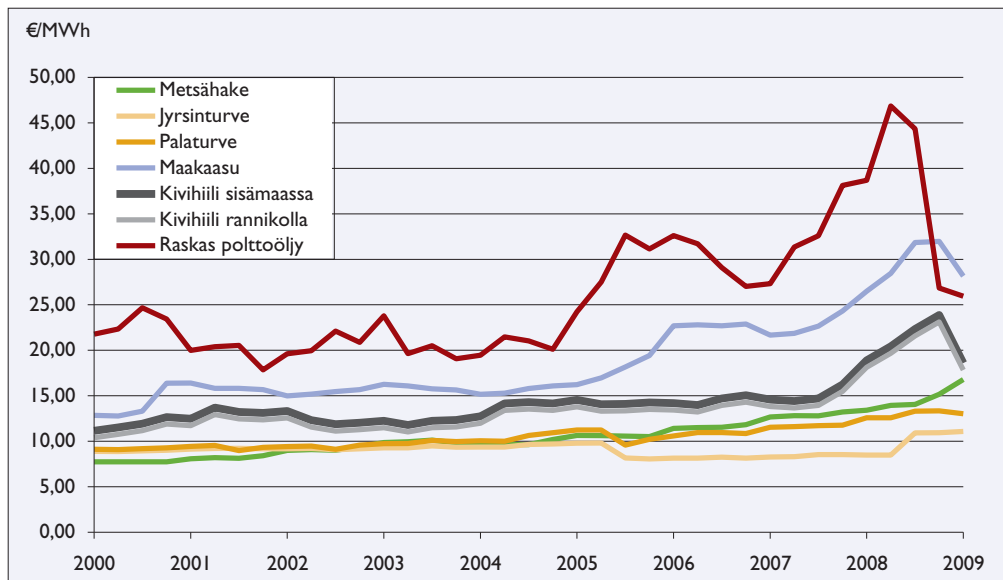
Puunperäisten polttoaineiden käyttö on kasvanut Suomessa 80-luvulta asti melko tasaisesti, ja EU:n nostaessa tavoitteita uusiutuvien polttoaineiden käytölle tulee niiden osuus korostumaan entisestään. EU-maiden yhteiseksi tavoitteeksi on asetettu uusiutuvien energiamuotojen kattavan 20 % kaikesta energiantuotannosta (KOM(2008) 19). Suomen osalta osuus tulee olemaan jopa 38 %, josta vajaa puolet tulnaisiin kattamaan puupolttoaineilla (TEM 2008).

Metsäbiomassan riittävyys pienten polttolaitosten käyttöön riippuu monesta tekijästä. Vuonna 2006 kotimaisista hakkuista ja tuontipuista jäi energiakäyttöön 26,5 TWh, josta 20,5 TWh oli metsäteollisuuden prosesseista syntyvää sivutuotetta ja loput metsätähdehaketta (Pöyry 2009). Metsäteollisuuden kapasiteetin sulkeminen vaikuttaa sekä syntyvien sivutuotteiden määrään että kotimaisiin hakkuisiin, ja sitä kautta syntyvään metsähakkeeseen. Suomen ilmasto- ja energiastategiassa (TEM 2008) metsähakkeen hyödyntämisen tehostaminen on merkittävässä roolissa bioenergian osuuden lisäämisessä, ja tavoitteena on käytön nostaminen vuoden 2006 noin 3,6 miljoonasta kiinto-m<sup>3</sup>:stä runsaaseen 12 miljoonaan kiinto-m<sup>3</sup>:in vuoteen 2020 mennessä.

Vaikka metsäbiomassan vuotuinen hakkuukertymä olisikin teoriassa riittävä, sen käytön ohjautumiseen liittyy huomattavia epävarmuuksia. Metsähakkeen käytön lisääminen vaatii panostusta korjuu- ja jakeluverkostoon, jolloin polttoaineen hinta nousee. Metsähaketoimitusten hinnat olivat jo keväällä 2009 yli 16 €/MWh, kun ne metsäteollisuuden kuitupuulla ovat luokkaa 20 €/MWh (Pöyry 2009). Metsähakkeen hinnan noustessa edelleen on mahdollista, että kuitupuuta alkaa ohjautua energiakäyttöön. Metsäteollisuuden rakennemuutos saattaa kuitenkin tuoda energiayhtiöille myös uusia kilpailijoita, kuten biopolttoaineiden ja pellettien tuotantolaitoksia. Näiden lisäksi kilpailua saattaa aiheuttaa Euroopan markkinoiden hintataso. Maakohtaiset uusiutuvan energian osuuden tavoitteet voivat synnyttää erilaisia tukitoimia, jotka nostavat useiden Euroopan maiden puustamaksukykyä niin, että polttoainetta olisi kannattavaa kuljettaa pitkienkin etäisyyksien päästä. Tämä vaikeuttaisi energiapuun saatavuutta kotimaassa ja nostaisi turpeen käytön tarvetta.

Päästöoikeuden hinta vaikuttaa merkittävästi energiayhtiöiden puustamaksukykyyn. Korkea hinta näkyy puupolttoaineiden käytön kasvuna, varsinkin sivutuotteiden siirtyessä jalostuslaitoksista energiakäyttöön. Toisaalta se taas ohjaa käyttöä päästökaupan piirissä oleviin, pääsääntöisesti yli 20 MW:n laitoksiin, jolloin saatavuus pienissä lämpölaitoksissa vaikeutuu. Matala päästöoikeuden hinta laskisi energiapuun kokonaiskäyttöä, mutta kilpailun väheneminen voisi parantaa polttoaineen saatavuutta pienissä laitoksissa.

Vaihtoehdot kiinteille polttoaineille alle 50 MW:n kokoluokassa ovat lähinnä raskas polttoöljy ja maakaasu. Öljy- ja kaasulaitosten investointikustannukset ovat alhaisemmat, mutta käyttötuntien lisääntyessä korostuu polttoaineen hinnan merkitys, jolloin kiinteän polttoaineen laitokset tulevat edullisemmiksi. Kuvassa 3 näkyy polttoaineiden verottoman hinnan kehitys vuodesta 2000.



Kuva 3. Polttoaineiden käyttäjähinnat lämmöntuotannossa (Tilastokeskus 2009)

## 4 Hiukkaspäästöjen vähentäminen

Hiiliyhdisteistä syntyvien hiukkasten määrään voidaan vaikuttaa polttotekniikalla. Tehokkaassa poltossa, kuten leijukerroskattiloissa ja suurissa voimalaitoksissa, jää palamattomien määrä usein häviävän pieneksi. Eri tekniikkavaihtoehdoista arinakattiloissa syntyvän noen ja hiilivetyjen osuus on suurin, johtuen polttoaineen ja ilman heikosta sekoittumisesta. Polttotekniikka vaikuttaa myös tuhkan kulkeutumiseen ja joutumiseen savukaasuihin. Arinapoltossa iso osa tuhkasta jää kattilan pohjalle, kun se muilla tekniikoilla kulkeutuu enemmän määrin savukaasujen mukana. (Ohlström 1998.)

Käytännössä kaikissa kiinteän polttoaineen laitoksissa on savukaasunpuhdistusjärjestelmä hiukkasten poistamiseksi. Tekninen ratkaisu riippuu vaadittavasta erotusasteesta, käytössä olevasta tilasta ja kustannuksista. Useissa laitoksissa on saman kanavan varrella monia eri tekniikalla toimivia erottimia.

Hiukkaserottimet voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan mekaanisiin erottimiin, sähkösuodattimiin, kuitusuodattimiin ja pesureihin. Mekaanisissa erottimissa pyritään pudottamaan savukaasun sisältämät partikkelit savukaasukanavan pohjalle painovoiman tai keskipakovoiman avulla siten, että ne ovat helposti kerättävissä talteen. Yksinkertaisin mekaaninen erotin on laskeutumiskammio, joka voi pelkisteyimmillään olla laajennettu kohta kanavassa, jonka pohjalle hiukkaset kerääntyvät. Selvästi tehokkain ja ainoa tutkittavissa laitoksissa käytetty mekaaninen erotin on sykloni.

Sykloneissa partikkelien erotus savukaasusta perustuu keskipakovoimaan. Kaasuvirtaus saatetaan pyöriivään liikkeeseen, tavallisesti syöttämällä savukaasu tangentiaalisesti syklonin lieriömäiseen yläosaan, jolloin hitausvoima saa hiukkaset törmäämään syklonin seiniin. Savukaasuvirrasta eronneet hiukkaset liukuvat painovoiman vaikutuksesta syklonin pohjasta ulos keräyssäiliöön. Sykloni on investointi- ja huoltokustannuksiltaan edullinen, mutta se toimii tehokkaasti vain karkeiden hiukkasten poistossa. Lisäksi se aiheuttaa merkittävän painehäviön savukaasukanavaan, joka lisää laitoksen omakäyttösähkön kulutusta. (Flagan & Seinfeld.)

Sähkösuodatin on yleisin kiinteiden polttoaineiden kattiloissa käytetty hiukkaserotin. Se soveltuu myös pienille laitoksille, mutta vaatimansa tilan ja asennuskustannusten takia sitä käytetään pääosin yli 10 MW:n yksiköissä. Sähkösuodattimen toiminnan perustana on hiukkasten varaaminen sähköisesti koronavaraajalla, jolloin ne kerääntyvät vastakkaismerkkisille keräinlevyille, jossa ne vähitellen menettävät varauksensa. Keräinlevyt puhdistetaan mekaanisesti esimerkiksi ravistinvasaroiden avulla ja hiukkaset pudotetaan pohjasiiloihin, josta ne kuljetetaan edelleen säiliöautoihin. Puhdistamatta jääneet keräinlevyt vaimentavat sähkökenttää ja aiheuttavat erotuskyvyn heikkenemistä. Myös märkiä pisaroita on mahdollista poistaa. Sähkösuodattimella voidaan käsitellä korkeita pölypitoisuuksia ja sillä on hyvä erotustehokkuus erityisesti karkeille hiukkasille, mutta verrattain korkea myös pienhiukkasille. (Flagan & Seinfeld.)



Kuitusuodatin on nykyisistä erotustekniikoista tehokkain ja sitä käytetään päästö- määräysten ollessa erityisen tiukat, tai esimerkiksi puolikuivan rikinpoistolaitoksen yhteydessä. Tehokkuus sähkösuotimeen verrattuna korostuu erityisesti pienhiukkasten erotuksessa. Kuitusuodattimia käytetään lähinnä suurissa ja keskisuurissa polttolaitoksissa, sillä niiden käyttökustannuksia nostavat korkeissa lämpötiloissa tarvittavat kalliit kuitumateriaalit, korkea painehäviö ja huollon tarve. Teknisesti niiden käyttö on kuitenkin mahdollista pienemmissäkin kattiloissa. (Hinds 1982.)

Märkäerottimia eli pesureita voidaan käyttää hiukkasten poistamiseen ja kemiaalien tai lämmön talteenottoon savukaasuista. Puhdistus perustuu siihen, että savukaasu ja pesuneste saatetaan kosketuksiin toistensa kanssa, jolloin hiukkaset törmäävät pisaroihin ja muodostavat lietettä, joka kerätään talteen. Pesuneste voidaan käyttää uudelleen, kun se on puhdistettu erillisessä vedenpuhdistuslaitoksessa. Pesuri sopii myös pieniin laitoksiin, sillä niihin on usein yhdistetty energiantuotannon hyötysuhdetta nostava lämmön talteenotto. Se soveltuu kuitenkin lähinnä vain karkeiden hiukkasten erotukseen. (Lahtinen & Komppula 1995.)

Taulukkoon 2 on koottu erotusmenetelmien ominaisuuksia ja soveltuvuutta pienen kokoluokan laitoksiin. Tarkastelussa ja laskuissa käytetyt puhdistintyyppit ja niiden erotusasteet on eritelty seuraavassa luvussa.

Taulukko 2. Erotusmenetelmien ominaisuuksia ja soveltuvuus pieniin laitoksiin (Jalovaara ym. 2003, Ohlström 2005)

Tekniikka	Soveltuvuus	Edut	Haitat
Sykloni/multisykloni	Arinakattilat 1–50 MW Kerrosleijukattilat 5–50 W	Halpa investointi ja alhaiset käyttökustannukset Vaatii vähän tilaa Voidaan lisätä olemassa oleviin kattiloihin	Suuri painehäviö Huono erotusaste pienhiukkasille Herkkä polttoaineen laadun vaihtelulle Erotusaste heikkenee tyypillisesti osateholla
Sähkösuodatin	Arinakattilat 3-50 MW Leijukattilat 5-50 MW (kerros- ja kiertoleiju)	Hyvä erotusaste ja alhaiset käyttökustannukset Pieni painehäviö	Korkeahkot investointikustannukset Soveltuvuus olemassa oleviin laitoksiin tapauskohtaista, koska vie paljon tilaa
Kuitusuodatin	Arinakattilat 5-50 MW Leijukattilat 5-50 MW (kerros- ja kiertoleiju)	Hyvä erotusaste myös pienillä hiukkasilla Poistaa myös raskasmetalleja ja kaasumaisia yhdisteitä	Suuri painehäviö Korkeahkot investointi- ja käyttökustannukset Herkkä palamisolosuhteille Soveltuvuus olemassa oleviin laitoksiin tapauskohtaista, koska vaatii tilaa
Pesuri	Arinakattilat 5-50 MW Leijukattilat 5-50 MW (kerros- ja kiertoleiju)	Yhtäaikainen kaasu- ja hiukkasmaisten päästöjen poisto Mahdollistaa lämmön talteenoton savukaasuista	Korroosio ja eroosio Lisääntyneet jäteveden käsittelykustannukset Huono erotustehokkuus pienimmille hiukkasille

Savukaasunpuhdistusta optimoidaan usein yhdistämällä erilaisia hiukkaserottimia. Puhdistimet voidaan suunnitella eri hiukkaskokoluokille, jolloin niiden ominaisuudet tukevat toisiaan. Esimerkiksi sykklonia on hyvä käyttää esierottimena tarkemmille puhdistuslaitteille. Sähkösuodattimen toiminta tehostuu, kun se voidaan optimoida tietylle hiukkaskokoalueelle, jolloin suuremmat hiukkaset voidaan poistaa sykklonilla ja tarvittaessa pienemmät kuitusuodattimella. Kuitusuodatinta edeltävä sykkloni suojelee sitä hehkuilta hiukkasilta ja vähentää puhdistustarvetta.

## 5 Metodit

### 5.1

#### PM<sub>2.5</sub>-päästöt

Tarkasteltujen laitosten primääriset hiukkaspäästöt ja hiukkasten leviäminen on laskettu Suomen ympäristökeskuksen Alueellisella päästöskenaariomallilla (FRES) (Karvosenoja 2008). Laitoksia käsitellään pistelähteinä, eli jokaiselle kattilalle on määritetty seuraavat parametrit:

##### Laitostiedot:

- Kapasiteetti C
- Polttotekniikka
- Hiukkaserotustekniikka, tehokkuus  $\eta_m$
- TSP – päästökerroin ennen savukaasunpuhdistusta EF

##### Operointitiedot:

- Pää- ja sivupolttoaine
- Huipunkäyttöaika H
- Aktiiviteetti  $A = C \cdot H$

##### Piipputiedot:

- Korkeus (ei vaikuta käytettyyn leviämislaskentaan, joka olettaa kaikki piiput alle 50 m korkuisiksi)
- Maantieteellinen sijainti

Tiedot yksittäisten laitosten kapasiteeteista, poltto- ja hiukkaserotustekniikoista, käytetyistä polttoaineista sekä hiukkaspäästöistä perustuvat VAHTI-rekisteriin (Korkia-Aho ym. 1995), ja puuttuvia tietoja on täydennetty laitoskyselyin (Savolahti 2008). Hiukkaspäästökertoimet perustuvat laitosten ilmoittamiin TSP-päästöihin ja polttoaineen kulutuksiin vuosilta 2000–2005. Näistä on laskettu keskiarvona kullekin laitokselle laitoskohtainen TSP-päästökerroin. Uusille kattiloille on käytetty arvoa 500 mg/MJ.

Listatuista tiedoista kunkin laitoksen päästöt vuodelle t voidaan laskea kaavalla

$$EM_t^P = (1 - \eta_m) \cdot A_t \cdot EF_1 \quad (1)$$

Samalla tavalla voidaan laskea päästöt erikokoisille hiukkasjakeille. Polttotekniikasta riippuen kunkin kattilan rajoittamattomat TSP-päästöt on jaettu PM<sub>10</sub>-, PM<sub>2.5</sub>-, PM<sub>1</sub>- ja PM<sub>0.1</sub>-osuuksiin (taulukko 3). Vastaavasti myös hiukkaserottimille on määritetty erotustehokkuus erikokoisille hiukkasille (taulukko 4).

Taulukko 3. Syntyvien hiukkasten rajoittamattomat kokojakaumat. Puulle, turpeelle ja niiden sekapolttolle on käytetty samoja arvoja (Sippula henk. koht. tiedonanto 2009, Moisio 1999).

Kattilatyyppi	PM10	PM2.5	PMI
Arinakattilat	48 %	36 %	28 %
Leijukerroskattilat	26 %	5 %	2 %
Raskasöljykattilat	60 %	30 %	27 %

Taulukko 4. Puhdistimien erotustehokkuudet erikokoisille hiukkasille (Karvosenoja ym. 2006, Sippula henk. koht. tiedonanto 2009). TSP-erotustehokkuudet on laskettava kattiloille erikseen riippuen syntyvästä hiukkasjakaumasta.

Puhdistuslaite	TSP-PM10	PM10-PM2.5	PM2.5-PMI	PMI
(Multi)Sykloni	90,0 %	70,0 %	50,0 %	50,0 %
Sähkösuodatin (1-kenttäinen)	97,0 %	96,0 %	94,0 %	94,0 %
Sähkösuodatin (2-kenttäinen)	99,9 %	99,0 %	96,0 %	96,0 %
Kuitusuodatin	99,9 %	99,7 %	99,7 %	99,7 %
Pesuri	99,0 %	99,0 %	77,0 %	44,0 %

FRES-mallilla on myös laskettu uusista savukaasunpuhdistimista aiheutuvat investointi- ja käyttökustannukset. Kustannuslaskelmia varten puhdistimille on määritetty seuraavat parametrit:

#### Tekniset tiedot:

- Erotustehokkuus  $\eta$
- Sähkönkulutus
- Syntyvän jätteen määrä

#### Kustannustiedot:

- Investointikustannus I
- Kiinteät käyttö- ja huoltokustannukset  $OM^{fix}$
- Muuttuvat käyttökustannukset  $OM^{var}$
- Laitteen käyttöikä  $lt$
- Korkokanta  $ir$

Vuosittaiset puhdistuskustannukset savukaasuille saadaan kaavasta

$$C^{an} = I^{an} + OM^{fix} + OM^{var} \quad (2)$$

jossa annuiteetti on

$$I_m^{an} = \frac{(1 - ir)^{lt} \cdot ir}{(1 + ir)^{lt} - 1} \cdot I_m \quad (3)$$

Verrattaessa vähennysskenaarion tuloksia peruslinjaan, saadaan saavutetun lisävähennyksen marginaalikustannus kaavalla

$$MC = \frac{(I_2^{an} + OM_2^{fix} + OM_2^{var}) - (I_1^{an} + OM_1^{fix} + OM_1^{var})}{EM_{t,1}^P - EM_{t,2}^P} \quad (4)$$

jossa  $_1$  on tilanne ilman uusia savukaasunpuhdistimia ja  $_2$  niiden kanssa. Käytetyt oletukset kustannustiedoille on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Savukaasunpuhdistuksen kustannuslaskelmien lähtötietoja (Karvosenoja ym. 2006, Ohlström 2005). Pesurille ei ollut saatavilla yleistettyjä käyttökustannuksia, joten sen kohdalla käytettiin kuitusuodattimen arvoja. Muut laskuissa käytetyt oletukset olivat tuhkan loppusijoituskustannus 30 €/t, omakäyttösähkön hinta 50 €/MWh, laitteiden käyttöikä 20 v, ja korkokanta 4 %.

Tekniikka	Sähkökulutus (kWh/GJ)	Kiinteät käyttökustannukset (% investoinnista)	Investointi kustannus (€/kW)
Sykloni, < 5 MW	0,15	0,5	6
Sykloni, 5 - 50 MW	0,15	0,5	1,6
Sähkösuodatin, < 5 MW	0,11	0,5	40
Sähkösuodatin, 5 - 50 MW	0,11	0,5	14
Kaksikenttäinen sähkösuodatin, 5 - 50 MW	0,14	0,5	17
Pesuri	0,2	1,0	35
Kuitusuodatin	0,2	1,0	18

## 5.2

### Pitoisuudet ja väestöaltistus

Laskettujen päästöjen leviämistä ja niistä syntyviä pitoisuuksia on arvioitu FRES-mallin lähde- kohde-kulkeumamatriisien avulla, jotka perustuvat Ilmatieteenlaitoksen SILAM-mallilaskelmiin (Sofiev et al. 2006a, b). Väestöaltistusta on arvioitu väestöpainotetulla pitoisuuksilla (aiheutuvat pitoisuudet koko Suomen yli painotetaan väestötiheyksillä), joka kuvaa päästöistä aiheutuvaa keskimääräistä pitoisuutta suomalaisten hengitysilmassa. Lisäksi jokaisen skenaarion peruslinjasta on laskettu päästö-altistus-suhde, joka kuvaa aina kyseisen päästösektorin keskimäärin aiheuttamaa väestöaltistusta yhtä päästöyksikköä kohden, helpottaen eri sektorien vertailemistä keskenään.

## 5.3

### Kattilakannan rajaus ja skenaarioissa käytetyt oletukset

Selvityksessä oli 127 puu- / turvekäyttöistä kattilaa, joiden polttoaineenkulutus vuonna 2005 oli 24,4 PJ. Se vastasi 83 % kokoluokan puu- ja turvepolttoaineiden käytöstä. Näistä kattiloista noin 2/3 oli yhdyskuntien lämpökeskuksia ja loput teollisuuskattiloita. Puu oli yleisempi pääpolttoaine, ja sen käyttö oli 16,3 PJ. Raskasöljykattiloita oli 88, ja ne kuluttivat polttoainetta samana vuonna 10,6 PJ, kattaen 40 % öljypolttoaineiden käytöstä pienissä kattiloissa. Laskennan ulkopuolelle pyrittiin jättämään vara- ja huippuvoimakattilat rajaamalla huipunkäyttöajan minimi 2000 tuntiin.

Puupolttoaineiden kysyntä energiantuotantolaitoksissa tulee kasvamaan, mutta niiden riittävyys voi olla ongelma. Saatavuuden vaikutuksia päästöihin on kuvattu kahdessa skenaariossa, jotka pohjautuvat Pöyryn arvioon puupolttoaineiden kysynnästä ja tarjonnasta vuonna 2020 (Pöyry 2007). Molemmissa tapauksissa päästöjen vähennyspotentiaalia ja -kustannuksia on arvioitu kahdella eri tekniikkavaihtoehdolla, joissa laitoksiin lisätään tarpeen mukaan nykyistä tehokkaammat savukaasunpuhdistimet. Öljykattiloiden päästöjen kehittymistä on arvioitu jättämällä pois vuoden 2005 jälkeen käyttämättä olleet kattilat ja olettamalla, että niitä ei korvata uusilla. Tällöin käyttö vähenisi perusvuodesta noin 30 %.

### 5.3.1

#### Polttoaineenkäytön kehitys

Päästökauppa ja muut ulkoiset tekijät vaikuttavat puupolttoaineiden saatavuuteen varsinkin yhdyskuntien lämpökeskuksissa. Ne sijaitsevat myös usein taajamissa asutuksen yhteydessä, joten ne ovat hiukkaspäästöille altistamisen kannalta mielenkiintoisin kohde. Skenaarioissa puupolttoaineiden määrän vaihtelut rajoittuvat näihin kattiloihin. Loput kattiloista ovat teollisuuden höyrykeskuksia, joiden käytämä polttoaine on tavallisesti metsäteollisuuden sivutuotteita samalta laitosalueelta. Metsäteollisuuden tulevaa rakennemuutosta ei ole tässä tarkastelussa arvioitu, joten näiden kattiloiden polttoaineenkäyttö pysyy skenaarioissa nykyisellään.

### 5.3.2

#### Kattilakannan muutokset

##### **Skenaario A: Puun saatavuus vaikeutuu**

Lähtöoletuksen mukaan puupolttoaineiden kysyntä yhdyskuntien lämpökeskuksissa kaksinkertaistuu vuodesta 2006 vuoteen 2020, mutta saatavuus laskisi melkein 25 %. Vajetta korvataan turpeella, jolloin kokonaiskäyttö pysyy osapuilleen vuoden 2005 tasolla. Tällä hetkellä suunnitteilla tai rakenteilla olevat kuusi uutta puu-/turvelaitosta otetaan käyttöön, jolloin kapasiteetti nousee 143 MW. Olemassa olevien kattiloiden käyttöastetta lasketaan lisäystä vastaava määrä.

##### **Skenaario B: Puun saatavuus kysynnän mukaan**

Tässä skenaariossa pienten lämpökeskusten on oletettu saavan kaiken tarvitsemansa puupolttoaineen, joka voi olla seurausta tehostuneesta metsähakkeen hyödyntämisestä, tai kuitupuun ohjautumisesta energiakäyttöön. Puupolttoaineen käyttö kattiloissa kasvaa noin 10 PJ, ja se korvaa samoissa kattiloissa käytetyn turpeen määrää niin, että kokonaisenergiankäyttö nousee 7 PJ. Uusia kattiloita rakennetaan yhteensä 60, joista 9 on 20–40 MW:n lämpölaitoksia, ja loput 3–4 MW:n biokattiloita, joissa poltetaan pelkästään puuta. Sekapolttolaitokset sijoitetaan keskikokoisiin kaupunkeihin ja biokattilat pääosin alle 10 000 asukkaan kuntiin. Kaikki nykyiset laitokset pysyvät käytössä, jolloin kapasiteetti nousee yhteensä 503 MW.

### 5.3.3

#### Oletukset hiukkaserottimille

Peruslinjoissa laitoksissa käytetään niiden nykyisiä hiukkaserottimia. Uusille yli 5 MW:n kattiloille oletetaan hiukkaserottimeksi yksikenttäinen sähkösuodatin (ESP 1) ja sitä pienemmille sykloni. Vähennysskenaarioissa on molemmille puun saatavuuden ennusteille laskettu peruslinjan lisäksi kaksi tehokkaampaa tekniikkavaihtoehtoa, joita sovelletaan sekä olemassa oleviin että uusiin kattiloihin.

##### **Peruslinja:**

- Nykyiset erotustekniikat olemassa oleville kattiloille
- uusiin < 5 MW:n kattiloihin sykloni
- uusiin 5–50 MW:n kattiloihin yksikenttäinen sähkösuodatin

##### **Tekniikkavaihtoehto 1:**

- < 5 MW:n puu-/turvekattiloihin sykloni
- 5 – 50 MW:n puu-/turvekattiloihin yksikenttäinen sähkösuodatin
- 5 – 50 MW:n raskasöljykattiloihin sykloni

**Tekniikkavaihtoehto 2:**

- < 10 MW:n puu-/turvekattiloihin yksikenttäinen sähkösuodatin
- 10 – 50 MW:n puu-/turvekattiloihin kuitusuodatin
- < 20 MW:n raskasöljykattiloihin sykloni
- 20 – 50 MW:n raskasöljykattiloihin yksikenttäinen sähkösuodatin

## 6 Pienten polttolaitosten päästöt ja väestöaltistus vuonna 2020

### 6.1

#### Päästömäärät ja savukaasunpuhdistuksen kustannukset

Skenaarioiden aktiviteetit, hiukkaspäästöt ja vähennyskustannukset on esitetty taulukossa 6. Skenaariossa A puun saatavuus vaikeutui ja vajetta korvattiin turpeella, jolloin kokonaiskäyttö laski nykyisestä tasosta vain hieman. Hiukkaspäästöissä lasku on kuitenkin selkeämpi, sillä uudet laitokset olivat vähäpäästöisempiä kuin olemassa olevat keskimäärin.

Skenaariossa B puun saatavuus parani huomattavasti, jonka myötä rakennettiin uutta kapasiteettia ja nostettiin kattiloiden vuotuista käyttöastetta. Hiukkaspäästöt kasvoivat suhteellisesti aktiviteetin nousua enemmän, kun puun käyttö lisääntyi. Tämä johtuu siitä, että melkein puolet lisääntyneestä kapasiteetista oli peräisin uusista alle 5 MW:n arinakattiloista, joissa hiukkaserottimeksi on oletettu sykloni. Tehostuneesta savukaasunpuhdistuksesta huolimatta skenaarion B1 päästöt olivat vielä samalla tasolla kuin vuoden 2005.

Skenaariossa A1 saavutettiin 44 %:n päästövähennys peruslinjaan verrattuna. Tämä osoittaa, että nykyisellään savukaasunpuhdistuksen taso laitoksissa on erittäin vaihteleva ja vähennyspotentiaali huomattava. Selkeästi suurin päästövähennys saavutettiin sähkösuodatinten lisäämisellä yli 5 MW:n laitoksiin.

Sekä A2 että B2 -skenaarioissa saavutettiin lähes 90 %:n päästövähennys peruslinjoihin verrattuna. Päästöjen vähentämisessä olivat merkittäviä sekä kuitusuodattimet yli 10 MW:n laitoksissa että sähkösuodattimet alle 10 MW:n laitoksissa.

Marginaalikustannukset lisävähennyksille olivat kaikissa skenaarioissa verrattain alhaisia: 1 100–1 200 €/Mg ja 3 500–4 400 €/Mg, kun tekniikkavaihtoehtoja 1 ja 2 verrataan peruslinjoihin, vastaavasti.

Taulukko 6. Puu-/turvekattiloiden päästöt ja vähennyskustannukset. Vertailun vuoksi luvut on esitetty myös vuodelle 2005. Vähennyskustannusten laskennassa investointikustannus on otettu huomioon vain uusilla (vuoden 2005 jälkeen asennetuilla) päästövähennysinvestoinneilla.

Skenaario	Aktiviteetti (PJ)	Käytetyt vähennystekniikat	PM2.5-päästö (t/a)	Tekniikka-kohtainen päästövähennys (t/a)	Vähennyskustannus (k€/a)	Marginaalikustannus (€/Mg)
2005	24,4	Nykyinen	640	-	800	0
A Peruslinja	23,8	Nykyinen	590	-	900	0
A1	23,8	< 5 MW sykloni / > 5 MW ESP I	330	5 / 255	1200	1200
A2	23,8	< 10 MW ESP I / > 10 MW kuitusuodatin	70	240 / 280	3200	4400
B Peruslinja	31,4	Nykyinen	920	-	1300	0
B1	31,4	< 5 MW sykloni / > 5 MW ESP I	640	5 / 275	1600	1100
B2	31,4	< 10 MW ESP I / > 10 MW kuitusuodatin	100	415 / 405	4200	3500

Öljykattiloilla päästötasot olivat aktiiviteettiin nähden huomattavasti alhaisemmat kuin kiinteän polttoaineen kattiloilla (taulukko 8). Öljykattiloiden päästökertoimet ennen savukaasunpuhdistusta olivat tyypillisesti kertaluokkaa pienemmät kuin puu-/turvekattiloilla, mutta vain noin joka seitsemännessä oli hiukkaserotin. Kuten arinakattiloissa, öljykattiloissa hiukkaspäästöt ovat suurelta osin pienhiukkasia, joten syklonin lisääminen niihin vaikuttaa päästöihin verrattain vähän. Sähkösuodatin olisi myös öljykattiloissa tehokas vaihtoehto, mutta ne eivät sovellu kovin pieniin öljylaitoksiin, ja yli 20 MW:n jatkuvakäyttöiset öljykattilat ovat harvinaisia. Saavutettuihin päästövähennyksiin nähden erotuskustannukset nousivat öljykattiloissa huomattavasti korkeammiksi kuin kiinteillä polttoaineilla: 4 500 €/Mg ja 11 000 €/Mg tekniikkavaihtoehtoilla 1 ja 2, vastaavasti.

Taulukko 8. Öljykattiloiden päästöt ja vähennyskustannukset. Vertailun vuoksi luvut on esitetty myös vuodelle 2005.

Skenaario	Aktiiviteetti (PJ)	Käytetty tekniikka	PM2.5-päästö (t/a)	Vähennyskustannus (k€/a)	Marginaalikustannus (€/Mg)
2005	10.6	Nykyinen	97	39	-
Peruslinja	7.6	Nykyinen	70	30	-
Tekniikka 1	7.6	> 5 MW sykloni	50	120	4500
Tekniikka 2	7.6	< 20 MW sykloni, > 20 MW ESP I	40	360	11000

## 6.2

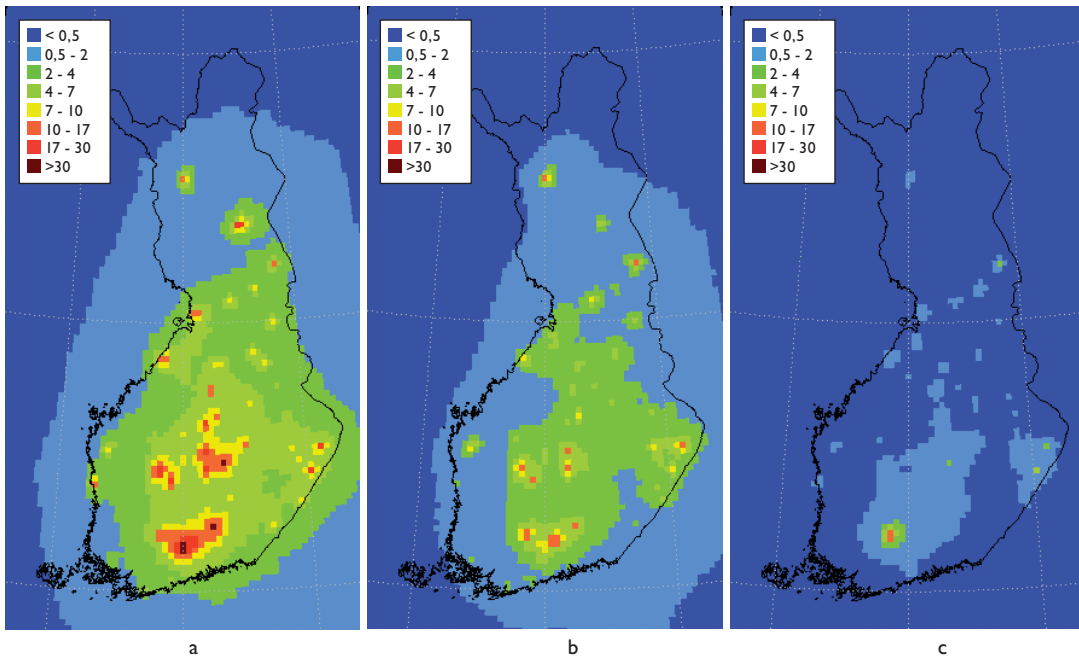
### Päästöjen vaikutus pitoisuuksiin ja väestöaltistukseen

Tässä luvussa on esitetty puunkäytöskenaarioiden päästöistä aiheutuvat hengitysilman pienhiukkaspitoisuudet eri tekniikkavaihtoehtoilla, sekä tunnuslukuja niiden aiheuttamille väestöaltistuksille. Lisäksi vastaavat tulokset on esitetty tarkastelluille öljykattiloille.

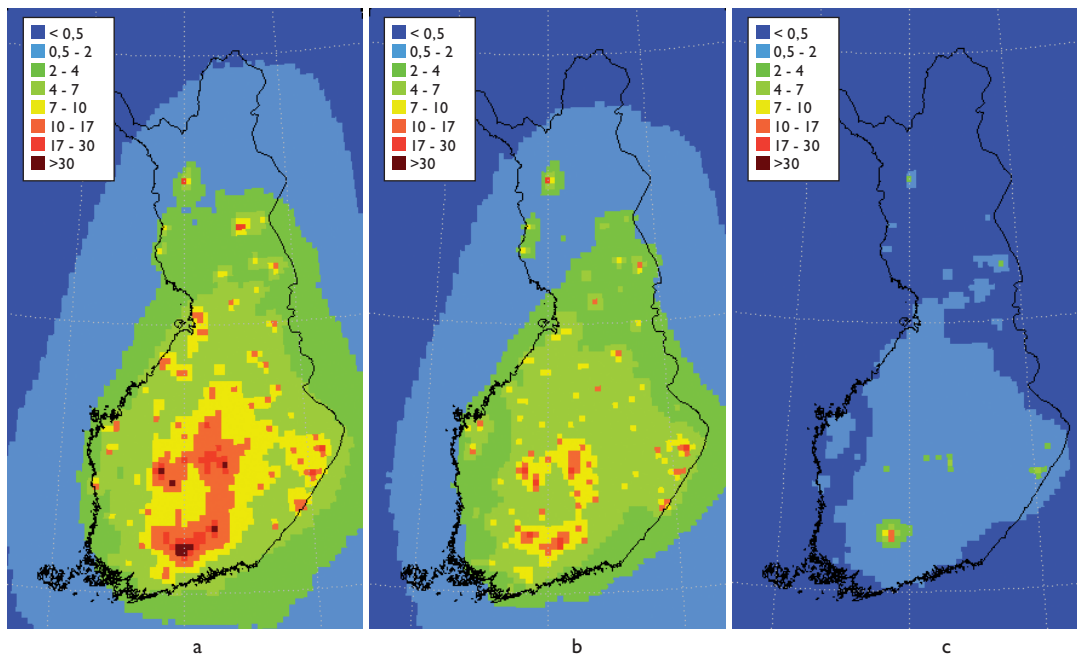
Kiinteän polttoaineen kattiloiden aiheuttamat pienhiukkaspitoisuudet puunsaantiskenaarioissa A ja B on esitetty kuvissa 4 ja 5, vastaavasti. Kartoista näkyy pitoisuuksien selkeä aleneminen savukaasunpuhdistuksen tehostuessa. On kuitenkin huomattava, että peruslinjoissakin pienten laitosten päästöistä aiheutuvat mallinnetut vuosikeskiarvopitoisuudet ovat verrattain matalia (alle 60 ng/m<sup>3</sup>). Korkeimmat pitoisuudet sijaitsevat Keski- ja Etelä-Suomessa, lähinnä keskikokoisten kuntien (esim. Jyväskylä, Riihimäki, Heinola) alueella, eli tiheimpien väestökeskittymien ulkopuolella.

Öljykattiloiden energiankäyttö oli selvästi alhaisempi kuin kiinteän polttoaineen kattiloissa, joka näkyy myös aiheutuneissa pitoisuuksissa (kuva 6). Kartan 6a korkeimmat pitoisuudet aiheutuvat muutamasta erityisen paljon päästöjä tuottavasta kattilasta, joissa ei ole savukaasunpuhdistusta.





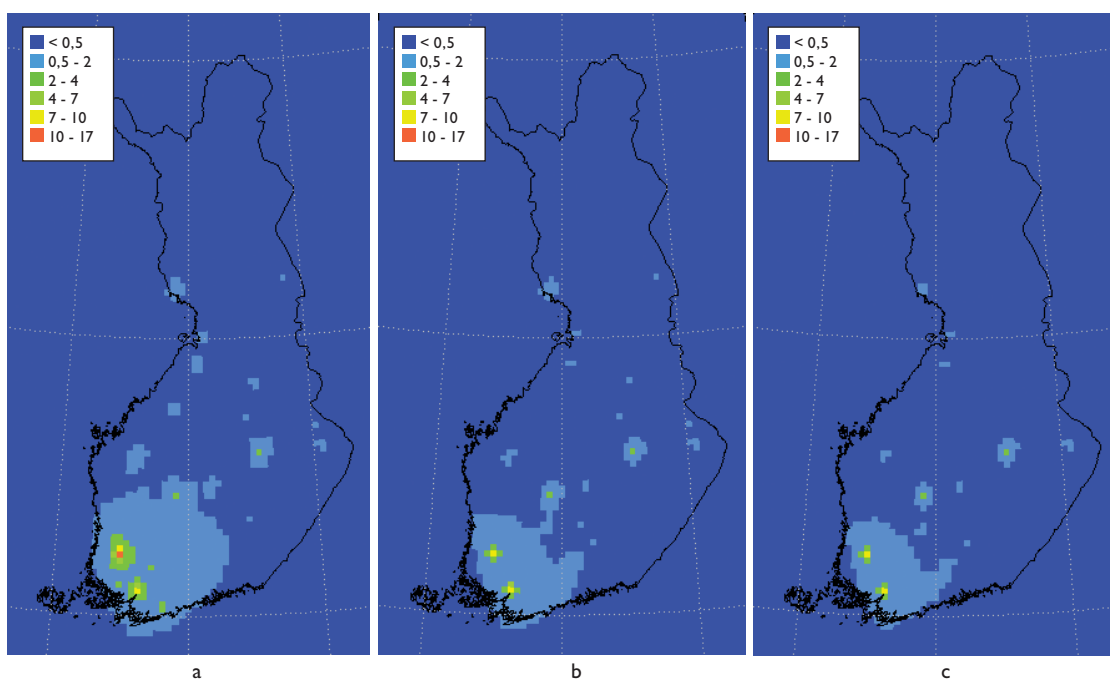
Kuva 4. Skenaarion A puu-/turvelaitosten päästöistä aiheutuvat PM<sub>2.5</sub>-pitoisuudet (ng/m<sup>3</sup>). Kuvat esittävät peruslinjaa (a) sekä vähennystekniikkavaihtoehtoja I (b) ja 2 (c).



Kuva 5. Skenaarion B puu-/turvelaitosten päästöistä aiheutuvat PM<sub>2.5</sub>-pitoisuudet (ng/m<sup>3</sup>). Kuvat esittävät peruslinjaa (a) sekä vähennystekniikkavaihtoehtoja I (b) ja 2 (c).

Pienten laitosten päästöjen aiheuttamaa keskimääräistä väestöaltistusta (Suomen yli laskettu väestöpainotettu pitoisuus) on tarkasteltu taulukossa 9. Väestöpainotetut pitoisuudet olivat melko alhaiset, mikä johtuu paitsi alhaisista päästöjen aiheuttamista taustapitoisuuksista, myös siitä, että päästöt tapahtuvat pääosin melko harvaan asutuilla alueilla.

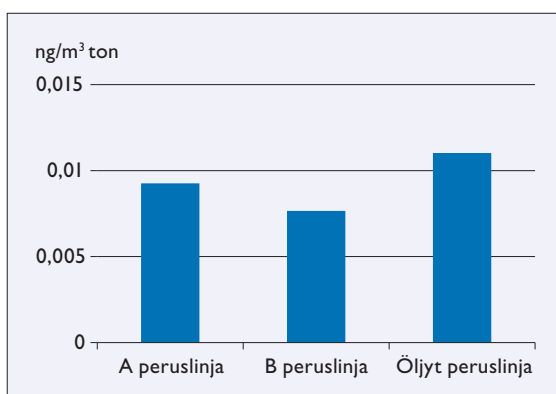
Päästö-altistus-suhteen vaihtelu puunsaantiskenaarioiden sekä öljylaitosten välillä näkyy kuvassa 7. Ero skenaarioiden A ja B välillä tarkoittaa, että skenaariossa B uudet laitokset sijoitettiin nykyisiä keskimäärin harvemmin asutetuille alueille. Öljykattiloista neljä eniten päästöjä aiheuttavaa laitosta tuottivat puolet niiden yhteispäästöistä, joten näiden laitosten sijainnin vaikutus päästö-altistus-suhteeseen on huomattava.



Kuva 6. Tarkasteltujen öljylaitosten päästöistä aiheutuvat  $PM_{2,5}$ -pitoisuudet ( $ng/m^3$ ). Kuvat esittävät peruslinjaa (a) sekä vähennystekniikkavaihtoehtoja 1 (b) ja 2 (c).

Taulukko 9. Skenaarioiden väestöpainotetut pitoisuudet.

Skenaario	Väestöpainotettu pitoisuus ( $ng/m^3$ )
A peruslinja	5.5
A I	2.6
A2	0.55
B peruslinja	7.0
B I	4.9
B 2	0.83
Öljyt peruslinja	0.78
Öljyt I	0.56
Öljyt 2	0.47



Kuva 7. Päästö-altistus-suhteet skenaarioiden peruslinjoille

## 7 Tulosten tarkastelu

### 7.1

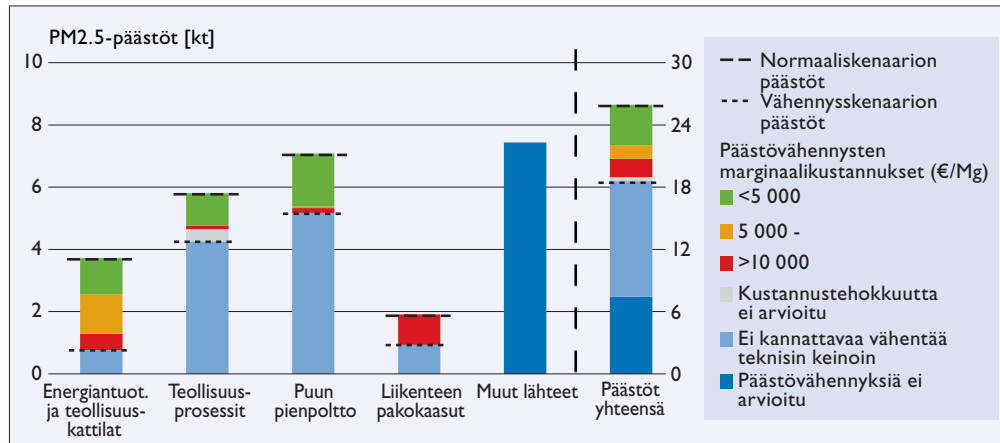
#### Päästöt ja vähennyskustannukset

Tarkasteltujen laitosten yhteenlasketut PM<sub>2,5</sub>-päästöt vuonna 2020 olivat skenaarioissa välillä 380–990 t, eli alle 4 % kansallisen ilmastostrategian arvioiduista kokonaispäästöistä kaikilla sektoreilla (Hildén ym. 2008). Päästömäärät olivat kokonaisuudessaan verrattain pieniä, mutta kustannustehokasta vähennyspotentiaalia niistä löytyi huomattavan paljon. Skenaarioissa saavutettiin 30–90 % päästövähennykset, marginaalikustannusten ollessa kiinteille polttoaineille kaikissa tekniikkavaihtoehdoissa alle 5000 €/Mg.

Skenaariolaskelmien perusteella tehokkaimmat yksittäiset päästövähennystoimenpiteet olivat kuitusuodattimien lisääminen yli 10 MW:n laitoksiin tai sähkösuodattimien lisääminen yli 5 MW:n laitoksiin. Kuitusuodattimien lisäämisen kustannukset olivat kuitenkin puolitoistakertaiset sähkösuodattimiin verrattuna. Myös sähkösuodatinten lisäämisellä alle 5 MW:n kattiloihin saavutettiin prosentuaalisesti merkittävät vähennykset, mutta pienimpien laitosten korkeista laitekustannuksista johtuen sähkösuodattimien käyttö oli huomattavasti kustannustehokkaampaa 5–50 MW:n laitoksissa. Kaikissa skenaarioissa ja kaikilla erotintyypeillä vuosittaiset kustannukset koostuivat pääosin laiteinvestoinnin annuiteetista.

Öljykattiloiden kokonaispäästöt ja sitä kautta niiden vähennyspotentiaali ei ollut kiinteän polttoaineen kattiloihin verrattuna merkittävä, ja myös vähennyskustannusten marginaalikustannukset olivat korkeammat. Koko Suomen mittakaavassa öljykattiloiden väestöaltistukset olivat hyvin alhaiset. Kuitenkin yksittäisten öljykattiloiden väliset erot päästökertoimissa olivat erittäin suuria, joten paljon päästöjä aiheuttavan raskasöljykattilan vaikutus paikalliseen ilmanlaatuun saattaa olla merkittävä.

Vähennyspotentiaalin ja -kustannusten suuruusluokasta saa käsityksen vertailemalla niitä aikaisempaan tutkimukseen, jossa on tarkasteltu kaikkien päästösektorien vähennyspotentiaalia Suomessa (Karvosenoja ym. 2007, kuva 8). Energiantuotantosektorin vähennyskustannukset on laskettu osittain eri lähtöoletuksilla, joten ne eivät ole suoraan verrattavissa tämän tutkimuksen kanssa. Mielenkiintoista on kuitenkin tarkastella esimerkiksi puun pienpolton arvioitua vähennyspotentiaalia suhteessa tämän tutkimuksen tuloksiin. Kokonaispäästöt ovat puun pienpoltossa noin kymmenen kertaa korkeammat kuin pienillä polttolaitoksilla, mutta arvioitu vähennyspotentiaali vain noin kaksinkertainen. Marginaalikustannukset ovat molemmissa pääosin luokkaa < 5000 €/Mg.



Kuva 8. Suomen arvioidut PM2.5-päästöt ja vähennyspotentiaalit sektoreittain vuonna 2020 (Karvosenoja ym. 2007).

## 7.2

### Pitoisuudet ja väestöaltistus

Tarkasteltaessa tässä tutkimuksessa arvioituja pitoisuusvaikutuksia on otettava huomioon, että SILAM-malli kuvaa päästöjen vaikutusta taustapitoisuuksiin 10 km alue-resoluutiolla. Malli soveltuu erityisesti voimalaitosten ja muiden korkeiden piippujen päästölähteiden arviointiin, ja tulokset kuvaavat hyvin tarkasteltujen laitosten aiheuttamia keskimääräisiä vuositaso pitoisuuksia alueellisessa mittakaavassa. Pienimmissä tarkastelluista laitoksista piippujen korkeudet ovat kuitenkin melko matalia (jopa alle 10 m), ja niiden päästöt saattavat vaikuttaa merkittävästi paikallisiin pitoisuuksiin. Yksittäisten laitosten pitoisuusvaikutusten arvioiminen vaatisi aina tapauskohtaista tarkastelua.

Tarkasteltujen laitosten primäärisistä pienhiukkaspäästöistä aiheutuneet mallinnetut pitoisuudet Suomen alueella olivat välillä  $<0,5\text{--}55\text{ ng/m}^3$ . Suomen  $\text{PM}_{2,5}$ -taustapitoisuuksien vuosikeskiarvot ovat tyypillisesti olleet noin  $4\text{--}9\text{ }\mu\text{g/m}^3$  (Laakso ym. 2003), josta suurin osa on Suomen ulkopuolelta kaukokulkeumana tulleita sekundaarihiukkasia. Pienten laitosten osuus Suomen vuositaso pienhiukkaspitoisuuksista on siis hyvin pieni, alle 1 %. Paikallisesti osuudet voivat kuitenkin olla korkeampia.

Peruslinjoilla väestöaltistus koko Suomen yli laskettuna (väestöpainotettu pitoisuus) oli kiinteän polttoaineen laitoksille välillä  $5,5\text{--}7\text{ ng/m}^3$ . Päästömääristä riippumaton keskimääräinen päästö-altistus-suhde pienille laitoksille oli  $0,0073\text{--}0,011\text{ ng}/(\text{m}^3\text{ ton})$ . Seuraavissa kahdessa luvussa pienten laitosten aiheuttamia altistuksia primäärihiukkasille on verrattu Suomen suurten pistelähteiden ja puun pienpolton vastaaviin arvoihin.

#### 7.2.1

##### Vertailu suurten pistelähteiden vaikutuksiin

Tutkimuksessa mallinnettiin vertailun vuoksi myös Suomen suurten pistelähteiden (yli 50 MW:n energiantuotantolaitokset ja suurimmat prosessiteollisuuslaitokset) primäärisistä PM2.5 päästöistä aiheutuvat pitoisuudet (kuva 9). Yli 50 MW energiantuotantolaitosten (kuva 9a) aiheuttamat pitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin tarkasteltujen pienempien kiinteän polttoaineen kattiloiden Peruslinjoilla (kuvat 4 ja 5). Selkeänä erona näkyy kuitenkin laitosten sijoittuminen: suuret laitokset sijaitsevat pääosin rannikolla, pienet laitokset sen sijaan sisämaassa, lähinnä Keski-Suomessa. Keskimääräinen päästö-altistus-suhde yli 50 MW:n energiantuotantolaitoksilla oli  $0,011\text{ ng}/(\text{m}^3\text{ ton})$ , eli samaa suuruusluokkaa kuin pienillä polttolaitoksilla. Väes-

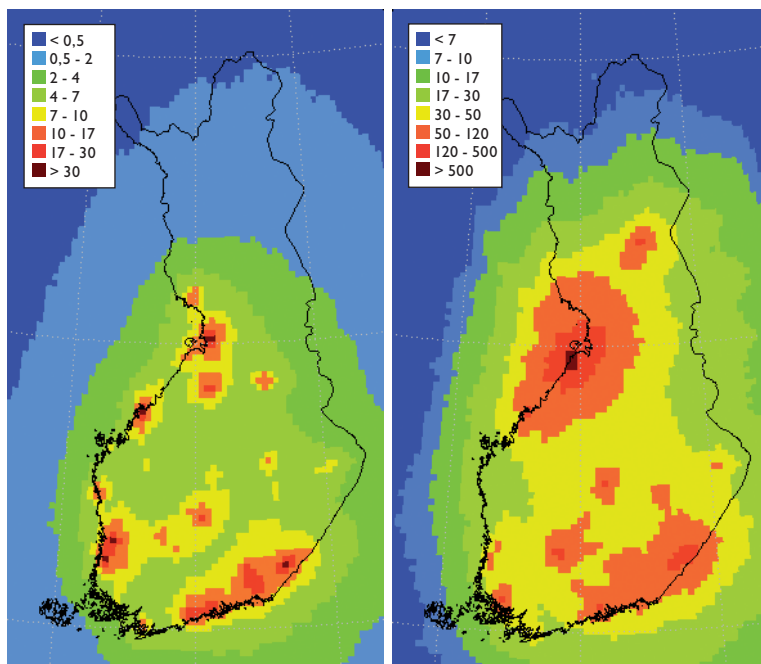
töpainotettu pitoisuus oli  $11 \text{ ng/m}^3$ , eli noin 2–1.5 -kertainen skenaarioiden A ja B peruslinjoihin verrattuna, vastaavasti, johtuen suurten laitosten korkeammista kokonaispäästöistä.

Kuvassa 9b on esitetty suurten pistelähteiden (yli 50 MW:n laitokset ja suurimmat prosessiteollisuuslaitokset) primääristen  $\text{PM}_{2.5}$  päästöjen yhteensä aiheuttama mallinnettu pitoisuus. Pitoisuudet ovat monin paikoin yli kertaluokkaa korkeammat kuin pelkille yli 50 MW laitoksille, ja korkeimmillaan noin  $1000 \text{ ng/m}^3$ . Näistä kahdesta prosessiteollisuuden aiheuttamat päästöt ovat siis selvästi hallitseva tekijä pitoisuusvaikutuksissa. Väestöpainotettu pitoisuus ja keskimääräinen päästö–altistus-suhde olivat  $56 \text{ ng/m}^3$  ja  $0,0066 \text{ ng}/(\text{m}^3 \text{ ton})$ , vastaavasti.

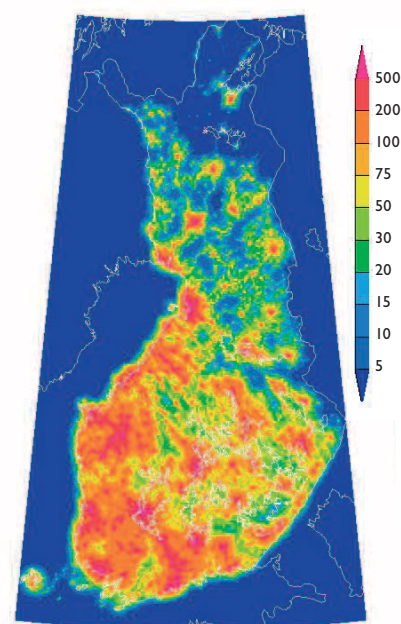
## 7.2.2

### Vertailu puun pienpoltton vaikutuksiin

Suomessa pienhiukkaspitoisuudet aiheutuvat pääasiassa Keski- ja Itä-Euroopasta tulevasta kaukokulkeumasta. Kotimaan päästölähteistä pitoisuuksiin vaikuttavat merkittävästi läheltä maanpintaa tapahtuvat primäärihiukkaspäästöt, esimerkiksi liikenteestä ja puun pienpoltosta. Matalalla sijaitsevat päästölähteet vaikuttavat pitoisuuksiin erityisesti päästöjen lähialueilla. Liikenteen ja puun pienpoltton päästöjen vaikutusta pitoisuuksiin on arvioitu aiemmissa tutkimuksissa (Karvosenoja ym. 2009). Kuvassa 10 on esimerkkinä esitetty puun pienpoltton primääristen pienhiukkaspäästöjen aiheuttamat mallinnetut pitoisuudet. Puun pienpoltosta aiheutuvat pitoisuudet olivat usein yli kertaluokkaa korkeampia kuin tässä tutkimuksessa mallinnetut pienistä polttolaitoksista aiheutuvat. Puun pienpoltton päästöjen aiheuttama keskimääräinen väestöaltistus koko Suomen yli laskettuna (väestöpainotettu pitoisuus) vuonna 2020 oli  $530 \text{ ng/m}^3$  ja päästö–altistus-suhde  $0,094 \text{ ng}/(\text{m}^3 \text{ ton})$ . Pitoisuudet on mallinnettu 1 km alueresoluutiolla perustuen Ilmatieteenlaitoksen paikallisen tason UDM–FMI-malliin (Karppinen ym. 1997).



Kuva 9. (a) Yli 50 MW:n energiantuotantolaitosten ja (b) kaikkien suurten pistelähteiden (suurimpien teollisuusprosessien ja yli 50 MW:n energiantuotantolaitosten) primääri- $\text{PM}_{2.5}$ -päästöistä aiheutuvat mallinnetut pitoisuudet vuonna 2020. Yksikkö  $\text{ng/m}^3$ .



Kuva 10. Puun pienpoltton primääri- $\text{PM}_{2.5}$ -päästöistä aiheutuvat mallinnetut pitoisuudet vuonna 2000 (Karvosenoja ym. 2009). Yksikkö  $\text{ng/m}^3$ .

## 8 Johtopäätökset

Puuperäisten polttoaineiden merkitys Suomen energiantuotannossa tulee korostumaan entisestään EU:n nostaessa tavoitteita uusiutuvien energianlähteiden käytölle. Bioenergian käyttö suosii hajautettua energiantuotantoa, jossa korostuu polttoaineen paikallinen saatavuus. Tämä voi lisätä tarvetta rakentaa uusia alle 50 MW:n polttolaitoksia. Metsäbiomassan saatavuus tulee olemaan merkittävä tekijä pienten polttolaitosten käytön lisäämisessä. Siihen vaikuttavat päästöoikeuden hinta sekä tukitoimet käytön edistämiseksi Suomessa ja Euroopassa, ja lisäksi se todennäköisesti vaatii panostusta metsähakkeen korjuun ja käytön tehostamiseen.

Pienten puu-/turvelaitosten polttoaineenkäyttö koko maan energiantuotannon mittakaavassa on suhteellisen vähäistä, joten myös niiden aiheuttamat pienhiukkaspäästöt ovat kokonaisuudessaan alhaiset. Tästä huolimatta pienistä laitoksista löytyi määrällisesti verrattain paljon kustannustehokasta päästövähennyspotentiaalia, sillä niiden savukaasunpuhdistus on tyypillisesti huomattavasti heikompaa kuin suurissa voimalaitoksissa.

Tarkasteltujen kattiloiden aiheuttama keskimääräinen väestöaltistus on kuitenkin moniin muihin päästölähteisiin verrattuna alhainen, johtuen päästökorkeudesta ja laitosten sijainnista melko harvaan asutuilla seuduilla. Tämän vuoksi niihin kohdistetut päästövähennystoimenpiteet eivät potentiaalisesta vähennysmäärästä huolimatta näytä olevan tehokas keino pienhiukkasten terveysvaikutusten vähentämiseksi koko maan tasolla.

## LÄHTEET

- 2001/80/EC. 2001. Directive of the European Parliament and of the Council on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. 23.10.2001
- Alaviippola B., Pietarila H., Lappi S. 2008. Pienten polttolaitosten (5 – 50 MW) piipun korkeuden mitoitus. Ilmatieteen laitos – ilmanlaadun asiantuntijapalvelut.
- CAFE. 2005. The Communication on Thematic Strategy on Air Pollution. SEC (2005) 1133. Commission of the European Communities
- Flagan R. & Seinfeld J. 1988. Fundamentals of air polluting engineering. Prentice-Hall, Inc. 542 s.
- Hildén M., Karvosenoja N., Koskela S., Kupiainen K., Laine A., Rinne J., Seppälä J., Savolahti M., Sokka L. 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian ympäristöarviointi. Suomen ympäristö 50/2008. 90 s.
- Hinds W.C. 1982. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. John Wiley & Sons, Inc. 424s.
- Jalovaara J., Aho J., Hietamäki E. & Hyytiä H., 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristö 649. 126s
- Johansson L. 2002. Characterisation of Particle Emissions from Small-Scale Biomass Combustion. Chalmers University of Technology. Department of Energy Technology. Thesis for the degree of licentiate of engineering.
- Karppinen A., Joffe S.M. and Vaajama P., 1997. Boundary layer parameterization for Finnish regulatory dispersion models. International Journal of Environment and Pollution 8:557-564.
- Karvosenoja N., Kupiainen K., Kangas L., Karppinen A., Sofiev M., Tainio M., Porvari P., Kukkonen J., Tuomisto T.J. 2009. Integrated modeling assessments of the population exposure in Finland to primary PM<sub>2.5</sub> from traffic and domestic wood combustion on the resolutions of 1 and 10 km. Proceedings of 7th Air Quality Conference, 23-27 March 2009, Istanbul.
- Karvosenoja N. 2008. Emission scenario model for regional air pollution. Doctoral dissertation. Monographs Boreal Environ. Res. 32
- Karvosenoja N., Tainio M., Kupiainen K., Tuomisto J. T., Kukkonen J. and Johansson M. 2008. Evaluation of the emissions and uncertainties of PM<sub>2.5</sub> originated from vehicular traffic and domestic wood combustion in Finland. Boreal Environ. Res. 13:465-474.
- Karvosenoja N., Zbigniew K., Tohka A. & Johansson M. 2007. Cost-effective reduction of fine primary particulate matter emissions in Finland. IOP Publishing. Environmental Research Letters. 8s.
- Karvosenoja N., Zbigniew K., Tohka A. & Johansson M. 2006. Fine particle emissions, emission reduction potential and reduction costs in Finland in 2020. The Finnish Environment 46/2006. 33s.
- KOM(2008) 19. EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä. Bryssel 23.1.2008
- Korkia-Aho S., Koski O., Meriläinen T. & Nurmio M. 1995. VAHTI – Käsiteanalyysi. Länsi-Suomen ympäristökeskus 29.9.1995. 35s.
- Kouvo P. 2003. Formation and control of trace metal emissions in co-firing of biomass, peat and wastes in fluidized bed combustors. Acta Universitatis Lappeenrantaensis ISSN 1456-4491, nr. 148. 75s.
- Kukkonen, J., Karppinen, A., Sofiev, M., Kangas, L., Karvosenoja, N., Johansson, M., Tuomisto, J., Tainio, M., Koskentalo, T., Aarnio, P., Kousa, A., Pirjola, L., Kupiainen, K., 2007. Kokonaismalli pienhiukkasten päästöjen, leviämisen ja riskin arviointiin - KOPRA. Tutkimuksia 1. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 41 s.
- Laakso L., Hussein T., Aarnio P., Komppula M., Hiltunen V., Viisanen Y., Kulmala M. 2003. Diurnal and annual characteristics of particle mass and number concentrations in urban, rural and Arctic environments in Finland. Atmospheric Environment, Volume 37, Issue 19, June 2003, s. 2629-2641
- Lahtinen T. & Komppula J. 1995. Pienten ja keskisuurten energiantuotantolaitosten ilmansuojelu. Ympäristöministeriö, muistio 1. 102s.
- Lihgty, J. S., Veranth, J. M., Sarofim, A., F. 2000. Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications on human health. ISSN 1047-3289 J. Air & Waste Manage. Accoc. 50:1565-1618
- Moisio, M. (1999) Real time size distribution measurements of combustion aerosols. Publication 279, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- Ohlström M., Tsupari E., Lehtilä A. & Raunemaa T. 2005. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. VTT tiedotteita 2300. 91s.
- Ohlström M. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. VTT tiedotteita 1934. 114s.
- Pöyry. 2007. Puupolttolaitosten kysyntä ja tarjonta Suomessa vuonna 2020. Selvitys. 34s.
- Pöyry. 2009. Metsäbioenergian saatavuus energiantuotantoon eri markkinatilanteissa. Loppuraportti. 43s.
- Ryphal K., Rive N., Åström S., Karvosenoja N., Kupiainen K., Bak J., & Aunan K. 2007. Nordic Air Quality Co-Benefits from European Poist-2012 Climate Policies. Energy Policy 35:6309-6322.
- Salonen R., & Pennanen A. 2006. Pienhiukkasten vaikutus terveyteen. Tuloksia ja päätelmiä teknologia-ohjelmasta FINE Pienhiukkaset – Teknologia, ympäristö ja terveys. Tekes. 33s.
- Savolahti M., Karvosenoja N., Tohka A., Kupiainen K. 2009. Fine particle emissions from small biomass fired combustion plants in Finland. Proceedings of 7th Air Quality Conference, 23-27 March 2009, Istanbul. CD-ROM. 4 pp.
- Savolahti M. 2008. Puuta ja turvetta polttavien alle 50 MW:n energialaitosten hiukkaspäästöt Suomessa. Diplomityö. 69s.

- Sippula O., Hokkinen J., Lamberg H., Puustinen H., Yli-Pirilä P., Tissari J., Jokiniemi J. 2009. Particle emissions from small biomass and fuel oil fired heating units. 17th European Biomass Conference and Exhibition - From Research to Industry and Markets
- Sofiev M., Jourden E., Kangas L., Karvosenoja N., Karppinen A., Kukkonen J. 2006a. Numerical modelling of the spatial distribution of fine particulate matter in Europe and Finland. Report series in Aerosol science, Finnish Association for Aerosol Research 83, 348–353.
- Sofiev M., Siljamo P., Valkama L., Ilvonen M., Kukkonen J. 2006b. A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data. Atmospheric environment 40. 674–685.
- Tainio M., Sofiev M., Hujo M., Tuomisto J. T., Loh M., Jantunen M. J., Karppinen A., Kangas L., Karvosenoja N., Kupiainen K., Porvari P., Kukkonen J. 2009. Evaluation of the European population intake fractions for European and Finnish anthropogenic primary fine particulate matter emissions. Atm. Environ. 43:3052-3059.
- TEM (Työ- ja elinkeinoministeriö). 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle. 6.11.2008. 130s.
- Tilastokeskus. 2009. Energian hankinta, kulutus ja hinnat 2009, 1. vuosineljännes.



## KUVAILULEHTI

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus (SYKE)			Julkaisu-aika Joulukuun 2009
Tekijä(t)	Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Kaarle Kupiainen, Ville-Veikko Paunu, Olli Sippula, Jorma Jokiniemi			
Julkaisun nimi	<b>Hajautetun energiantuotannon vaikutus väestön altistumiseen pienhiukkasille</b>			
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristökeskuksen raportteja 30 / 2009			
Julkaisun teema				
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut	Julkaisu on saatavana myös internetissä: <a href="http://www.ymparisto.fi/julkaisut">www.ymparisto.fi/julkaisut</a>			
Tiivistelmä	<p>Yhdyskuntailman hengitettävät pienhiukkaset ovat kansanterveydellisesti ja taloudellisesti vakava ympäristöongelma. Yksi merkittävästä ihmisen aiheuttamista pienhiukkasten syntyelähteistä on energiantuotannon polttoprosessit ja erityisesti kiinteiden polttoaineiden polttaminen. Energialaitosten savukaasunpuhdistukseen on viime vuosikymmeninä kiinnitetty paljon huomiota, mutta alle 50 MW:n laitoksilta puuttuvat yhtenäiset päästöraajat. EU:n nostaessa tavoitteita uusiutuvien energianlähteiden käytölle tulee puuperäisten polttoaineiden merkitys Suomen energiantuotannossa korostumaan entisestään. Tämä suosii hajautettua energiantuotantojärjestelmää, jolloin pienten polttolaitosten päästöt korostuvat.</p> <p>Tutkimuksessa arvioitiin pienten puu-/turvelaitosten pienhiukkaspäästöjä, päästövähennyspotentiaalia ja -kustannuksia sekä vaikutuksia hengitysilmän hiukkaspitoisuuksiin vuonna 2020. Tarkasteltavia skenaarioita on puupolttoaineen saatavuuden mukaan kaksi, joissa molemmissa käsiteltiin kolmea vaihtoehtoa käytettävälle savukaasunpuhdistustekniikalle. Laskelmat pohjautuvat Suomen ympäristökeskuksen AI-ueellisen päästöskenaariomallin (FRES) kattilakohtaiseen päästö- ja tekniikkarekisteriin. Primäärihiukkaspäästöjen aiheuttamat taustapitoisuudet ilmassa ja väestöaltistus Suomessa laskettiin käyttäen leviämismatriiseja.</p> <p>Tällä hetkellä savukaasunpuhdistus alle 50 MW:n laitoksissa on vaihtelevaa, ja niissä osoittautui olevan runsaasti kustannustehokasta päästövähennyspotentiaalia. Energiantuotantolaitosten päästöjen aiheuttama väestöaltistus on kuitenkin suhteellisen alhainen verrattuna mataliin päästölähteisiin, kuten puun pienpolttoon. Lisäksi alle 50 MW:n puu- ja turvelaitokset sijaitsevat melko harvaan asutuilla seuduilla. Tutkimuksen perusteella arvioitiinkin, että potentiaalisten päästövähennysten tuomat hyödyt alentuneina väestöaltistuksina jäisivät vähäisiksi.</p>			
Asiasanat	pienhiukkaset, päästöt, väestöaltistus, kustannukset, skenaariot, mallintaminen, pienet energiantuotantolaitokset, kiinteät biopolttoaineet			
Rahoittaja/toimeksiantaja	Suomen ympäristökeskus			
	ISBN 978-952-11-3680-1 (nid.)	ISBN 978-952-11-3681-8 (PDF)	ISSN 1796-1718 (pain.)	ISSN 1796-1726 (verkkok.)
	Sivuja 33	Kieli Suomi	Luottamuksellisuus julkinen	Hinta (sis.alv 8 %) -
Julkaisun myyntijakaja	Suomen ympäristökeskus (SYKE), asiakaspalvelu PL 140, 00251 Helsinki Puh. 020 690 183, faksi (09) 5490 2190 Sähköposti: <a href="mailto:neuvonta.syke@ymparisto.fi">neuvonta.syke@ymparisto.fi</a>			
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus (SYKE) PL 140, 00251 Helsinki Puh. 020 610 123 Sähköposti: <a href="mailto:neuvonta.syke@ymparisto.fi">neuvonta.syke@ymparisto.fi</a> , <a href="http://www.ymparisto.fi/syke">www.ymparisto.fi/syke</a>			
Painopaikka ja -aika	Edita Prima Oy 2010			

## PRESENTATIONSBLAD

Utgivare	Finlands miljöcentral (SYKE)		Datum December 2009	
Författare	Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Kaarle Kupiainen, Ville-Veikko Paunu, Olli Sippula, Jorma Jokiniemi			
Publikationens titel	<b>Hajautetun energiantuotannon vaikutus väestön altistumiseen pienhiukkasille</b> (Partikelutsläpp och belastning för befolkningen vid decentraliserad energiproduktion)			
Publikationsserie och nummer	Finlands miljöcentrals rapporter 30 / 2009			
Publikationens tema				
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns tillgänglig också på Internet <a href="http://www.ymparisto.fi/julkaisut">www.ymparisto.fi/julkaisut</a> (på finska).			
Sammandrag	<p>Partiklar i inandningsluften i tätorter är ett allvarligt miljöproblem med konsekvenser för folkhälsan och ekonomin. En betydande antropogen källa för partiklar är förbränningsprocesserna i energiproduktionen, speciellt förbränningen av fasta bränslen. Under de senaste årtiondena har man fäst stor vikt vid att rena utsläppen från energianläggningar, men inga enhetliga gränsvärden finns för anläggningar mindre än 50 MW. När EU höjer målsättningen för förnybar energi kommer betydelsen av biobränsle av trä att öka i energiproduktionen i Finland. Det gynnar decentraliserad energiproduktion varvid utsläppen från små anläggningar får större betydelse.</p> <p>Undersökningen uppskattade potentialen och kostnaderna för en minskning av partikelemissionen från små trä-/torvanläggningar samt effekten på halten partiklar i inandningsluften år 2020. Två scenarier för tillgången av träbränsle beaktades. Vardera scenariet innehöll tre alternativ för reningen av utsläppen. Beräkningarna bygger på utsläpps- och teknikregistret för förbränningsanläggningar i den regionala utsläppssceneriomodellen FRES vid Finlands miljöcentral. Transportmatriser användes för att beräkna hur utsläppen av primärpartiklar påverkade luftens bakgrundshalter och belastade befolkningen i Finland.</p> <p>Reningen varierar för anläggningar mindre än 50 MW och det visade sig att det finns gott om potential för att minska utsläppen kostnadseffektivt. Energiproduktionsanläggningarnas utsläpp utgör dock en förhållandevis liten belastning för befolkningen jämfört med små utsläppskällor som vedeldning i liten skala. Dessutom är trä- och torvanläggningarna med mindre än 50 MW lokaliserade i rätt glest bebyggda trakter. På basen av undersökningen gjordes bedömningen att de potentiella utsläppsminskningarna skulle föra med sig endast små minskningar i belastningen för befolkningen.</p>			
Nyckelord	mikropartiklar, utsläpp, kostnader, modellering, scenarier, små kraftverk, fasta bränslen, befolkningsexponering			
Finansiär/ uppdragsgivare	Finlands miljöcentral (SYKE)			
	ISBN 978-952-11-680-1 (hft.)	ISBN 978-952-11-3681-8 (PDF)	ISSN 1796-1718 (print)	ISSN 1796-1726 (online)
	Sidantal 33	Språk Finska	Offentlighet Offentlig	Pris (inneh. moms 8 %) -
Beställningar/ distribution	Finlands miljöcentral (SYKE), kundservice PB 140, 00251 Helsingfors Tfn. +358 20 690 183, fax +358 9 5490 2190 Epost: <a href="mailto:neuvonta.syke@ymparisto.fi">neuvonta.syke@ymparisto.fi</a>			
Förläggare	Finlands miljöcentral (SYKE) PB 140, 00251 Helsingfors Tfn. +358 20 610 123 Epost: <a href="mailto:neuvonta.syke@ymparisto.fi">neuvonta.syke@ymparisto.fi</a> , <a href="http://www.miljo.fi/syke">www.miljo.fi/syke</a>			
Tryckeri/tryckningsort och -år	Edita Prima Ab 2010			

## DOCUMENTATION PAGE

<i>Publisher</i>	Finnish Environment Institute (SYKE)			<i>Date</i> December 2009
<i>Author(s)</i>	Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Kaarle Kupiainen, Ville-Veikko Paunu, Olli Sippula, Jorma Jokiniemi			
<i>Title of publication</i>	<b>Hajautetun energiantuotannon vaikutus väestön altistumiseen pienhiukkasille</b> (Population exposure to fine particles due to decentralized power production)			
<i>Publication series and number</i>	Reports of the Finnish Environment Institute 30 /2009			
<i>Theme of publication</i>				
<i>Parts of publication/ other project publications</i>	The publication is available on the internet: <a href="http://www.ymparisto.fi/julkaisut">www.ymparisto.fi/julkaisut</a>			
<i>Abstract</i>	<p>Fine particulate matter (PM2.5) in ambient air has been associated with severe effects on human health and national economy. One of the main sources for anthropogenic particulate emissions are combustion processes in energy production, especially the combustion of solid fuels. The level of attention to flue gas cleaning requirements in combustion plants has increased significantly in the last decades, but common standards apply only to plants larger than 50 MW. The role of wood fuels in Finnish energy production will continue to increase with EU's aspiring goals for renewable energy use. This favors a system where energy production is less centralized, and thus the emissions from smaller plants may have a more significant role.</p> <p>This report explores PM2.5 emissions from small wood or peat fired combustion plants, their reduction potential, reduction costs, resulting concentrations in community air and population exposure in 2020. The results are calculated for two scenarios with different availability of wood fuels, and both scenarios have three alternatives for emission reduction. The emission calculations were done using the Finnish Regional Emission Scenario model (FRES) and the resulting concentrations and population exposure were calculated using dispersion matrices.</p> <p>The results show that at present the quality of flue gas cleaning in plants smaller than 50 MWs varies considerably, and remarkable potential for emission reductions was found. However, population exposure caused by the plants' emissions was relatively minor compared to those of low-altitude emission sources, like residential combustion of wood. In addition, small combustion plants are often located in sparsely populated areas. For those reasons it was estimated that realizing the discovered emission reduction potential would not show significant effects in lowering the overall population exposure in Finland.</p>			
<i>Keywords</i>	fine particles, emissions, population exposure, costs, scenarios, modeling, small power plants, solid fuels			
<i>Financier/ commissioner</i>	Finnish Environment Institute (SYKE)			
	ISBN 978-952-11-3680-1 (pbk.)	ISBN 978-952-11-3681-8 (PDF)	ISSN 1796-1718 (print)	ISSN 1796-1726 (online)
	<i>No. of pages</i> 33	<i>Language</i> Finnish	<i>Restrictions</i> Public	<i>Price (incl. tax 8 %)</i> -
<i>For sale at/ distributor</i>	Finnish Environment Institute (SYKE), Customer service P.O.Box 140, FI-00251 Helsinki, Finland Tel. +358 20 690 183, fax +358 9 5490 2190 Email: <a href="mailto:neuvonta.syke@ymparisto.fi">neuvonta.syke@ymparisto.fi</a>			
<i>Financier of publication</i>	Finnish Environment Institute (SYKE) P.O.Box 140, FI-00251 Helsinki, Finland Tel. +358 20 610 123, fax +358 20 490 2190 Email: <a href="mailto:neuvonta.syke@ymparisto.fi">neuvonta.syke@ymparisto.fi</a> , <a href="http://www.environment.fi/syke">www.environment.fi/syke</a>			
<i>Printing place and year</i>	Edita Prima Ltd 2010			

Puuperäisten polttoaineiden merkitys Suomen energiantuotannossa tulee korostumaan entisestään EU:n nostaessa tavoitteita uusiutuvien energianlähteiden käytölle. Bioenergian käytössä korostuu polttoaineen paikallinen saatavuus, jolloin se suosii hajautettua energiantuotantoa ja saattaa aiheuttaa tarvetta rakentaa uusia alle 50 MW:n polttolaitoksia. Tällä hetkellä näiden kunnallisten lämpölaitosten tai teollisuuden höyrykattiloiden savukaasunpuhdistus on suuria voimalaitoksia huomattavasti heikompaa, jolloin päästöt ovat energiankulutukseen nähden suurempia. Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu pienten polttolaitosten pienhiukkaspäästöjen vaikutusta hengitysilman pitoisuuksiin sekä tutkittu niiden vähennyspotentiaalia ja -kustannuksia.



**ISBN 978-952-11-3680-1 (nid.)**

**ISBN 978-952-11-3681-8 (PDF)**

**ISSN 1796-1718 (pain.)**

**ISSN 1796-1726 (verkkoj.)**