

# Pienpolton päästövähennyskeinojen kustannustehokkuus ja vaikutukset väestöaltistukseen

---

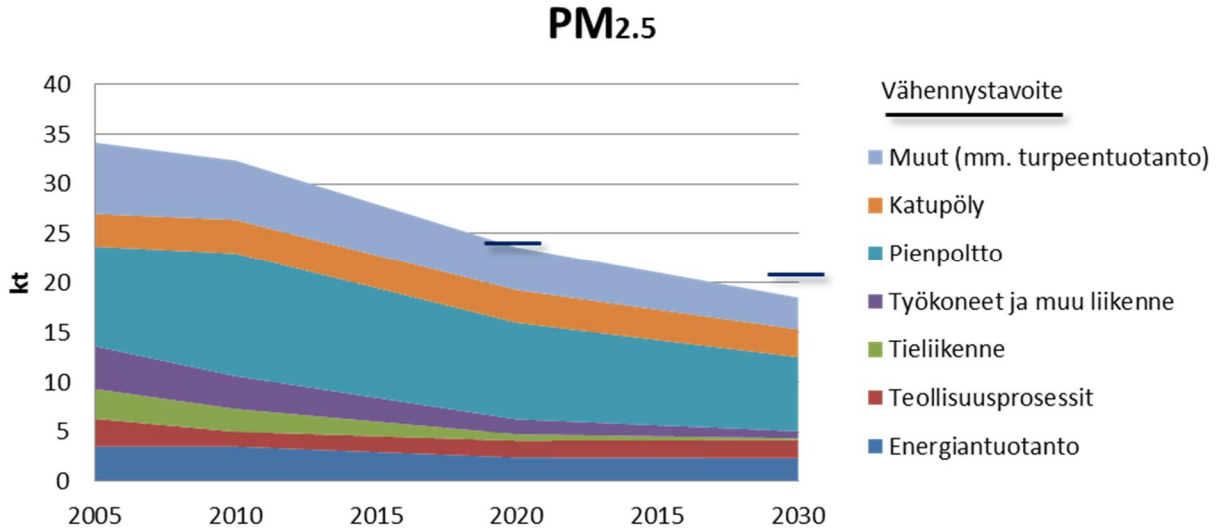
Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Kaarle Kupiainen, Ville-Veikko Paunu

2/2/2015

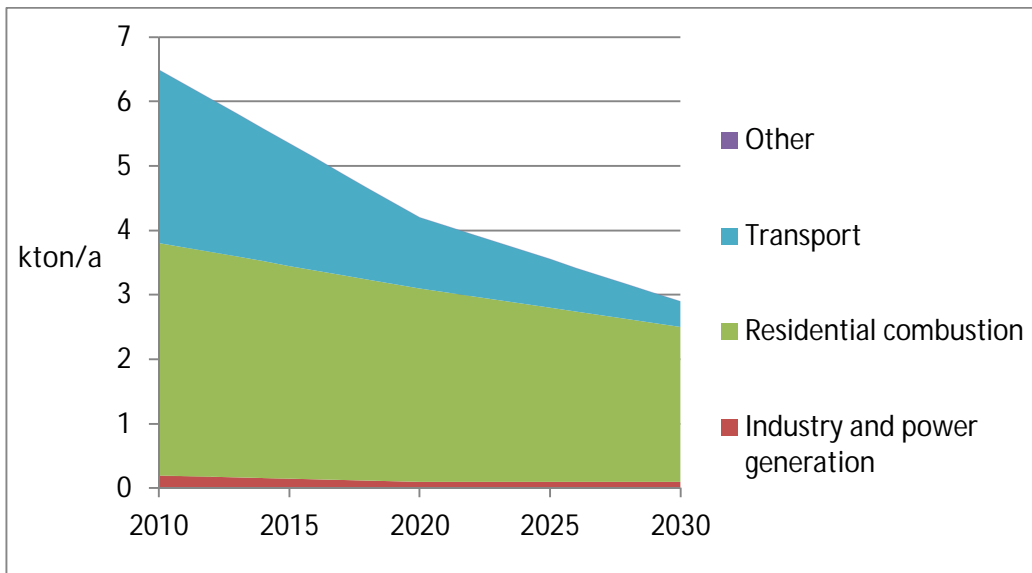
# 1 Johdanto

## Pienhiukkasten ja mustahiilipäästöjen päälähteet Suomessa

Pienhiukkasten (PM2.5 eli halkaisijaltaan alle 2.5 mikrometrin kokoiset hiukkaset) päästöjen merkittävimmät päästölähteet ovat puun pienpoltto ja liikenne (erityisesti tieliikenne ja dieselkäyttöiset työkoneet). Mustahiilelle puun pienpoltto ja liikenne ovat vielä selkeämmin päälähteet. Liikenteen pakokaasuperäiset päästöt ovat selvässä laskussa tiukenevan päästölainsäädännön ansiosta ja pienpoltto on noussut tärkeimmäksi yksittäiseksi lähteeksi 2000-luvulla. Tulevaisuudessa pienpolton suhteellinen merkitys tulee vielä kasvamaan liikenteen päästöjen edelleen vähentyessä. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty Suomen PM2.5 ja mustahiilipäästöt päälähteittäin arvioituna vuoteen 2030 saakka.



Kuva 1. Päästökehitys PM<sub>2.5</sub> pienhiukkasille Suomessa vuosille 2005-2030 viiden vuoden välein arvioituna (2005-2013 vuosittainen vaihtelu ei näy kuvassa). Tulevaisuuden päästöarvion taustalla olevat energiankulutusluvut ovat Suomen Energia- ja ilmastostrategian Tarkennetun perusskenaarion mukaiset (tässä raportissa "Peruslinja" viittaa pienpolton määriin Tarkennetussa perusskenaariossa). Vähennystavoite viittaa Euroopan komission valmistelemaan Päästökattodirektiivin päivitykseen (Euroopan komissio 2013). Tarkemmat tiedot raportista Suoheimo ym. (2015).



Kuva 2. Päästökehitys mustahiilelle Suomessa vuosille 2010-2030 viiden vuoden välein arvioituna (2010-2013 vuosittainen vaihtelu ei näy kuvassa). Tulevaisuuden päästöarvion taustalla olevat energiankulutusluvut ovat Energia- ja ilmastostrategian Tarkennetun perusskenaarion mukaiset (tässä raportissa "Peruslinja" viittaa pienpolton määriin Tarkennetussa perusskenaariossa).

Rakennusten lämmitys on energian käytön kannalta Suomen merkittävimpiä sektoreita. Vuonna 2010 asuinrakennusten lämmityksen primäärienergiankulutus oli 214 PJ (15 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta), josta pientalojen (omakoti-, pari- ja rivitalot sekä vapaa-ajan rakennukset) osuus oli 153 PJ (Energiatilasto 2011). Omakoti- ja paritaloja on noin 950 000, joista 10 %:ssa päälämmityskeinona on puukattila, ja 80 %:ssa on tulisija lämmitys- tai muuhun käyttöön. Lisäksi puulämmitteisiä rakennuksia ovat usein vapaa-ajan rakennukset ja joskus esim. maatalous- ja palvelurakennukset. Rivitaloissa tulisijat ovat harvinaisempia. Puuta poltetaan huoneilman lämmittämisen ohella myös saunakiukaissa, ruuanlaitossa ja tunnelman luomiseksi. Puuta poltettiin pientaloissa vuonna 2010 yhteensä 58 PJ ja maatalous-, palvelu- ja teollisuusrakennuksissa vajaa 12 PJ (Energiatilasto 2011).

Puun käyttömäärä pientaloissa on ollut jatkuvassa kasvussa 1980-luvulta lähtien ja 2000-luvulla kasvu on entisestään kiihtynyt, ollen vuositasolla noin 4 %. Viime vuosien kehitystä voi selittää puunpolton myönteisellä imagolla ja muiden lämmitysmuotojen, erityisesti öljyn ja sähkön hinnannousulla. Puunpolttoa on yleisesti pidetty keinona vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, joskin sen haitalliset ympäristövaikutukset ovat saaneet paljon tieteellistä huomiota viime vuosina. Poltosta syntyvät pienhiukkaset vaikuttavat sekä ilmakehän säteilypakotteeseen että ihmisten terveyteen.

Lähellä maanpintaa tapahtuvat päästöt aiheuttavat merkittävän vaikutuksen paikalliseen ilmanlaatuun. Suomen kaksi tärkeintä pienhiukkasten päästölähdettä ovat puun pienpoltto (37 % Suomen kokonaispäästöistä vuonna 2010) ja liikenne (28 %), joissa molemmissa päästöt syntyvät lähellä maantasoa (Suoheimo ym. 2015). Tieliikenteen ja työkoneiden pakokaasupäästöjä kontrolloidaan tiukentuvilla Euro-normeilla ja niiden viime vuosien merkittävän laskun oletetaan jatkuvan myös lähitulevaisuudessa, jolloin liikenteen vaikutus hiukkaspäästöihin tulisi lähinnä enää katupölyn kautta. Puun pienpoltolle vastaavaa lainsäädäntöä ei ole tähän mennessä ollut, ja sen osuus päästölähteenä tulee jatkossa korostumaan entisestään. Vaikka suurin osa erityisesti kattiloiden puunpoltosta tapahtuu haja-asutusalueilla, on tulisijojen suosio lisälämmityskeinona kasvanut myös taajamissa. Tiheimmin asutuilla alueilla päästöjen aiheuttama suhteellinen väestöaltistus on huomattavasti suurempi kuin haja-asutusalueilla. Noin 80 % puun pienpolton hiukkaspäästöjen aiheuttamasta väestöaltistuksesta on arvioitu tapahtuvan taajamien tulisijojen ja kiukaiden käytön seurauksena (Paunu 2013).

#### *Pienhiukkasten synty ja muuttuminen*

Pienhiukkasilla (PM<sub>2.5</sub>) tarkoitetaan halkaisijaltaan alle 2.5 µm:n kokoisia hiukkasia ja hengitettävillä hiukkasilla (PM<sub>10</sub>) alle 10 µm:n kokoisia hiukkasia. Nokihiuksaset (joiden pääkomponentti on mustahiili, BC) ovat epätäydellisessä palamisessa syntyviä pienhiukkasia.

Puun poltosta syntyvät pienhiukkaset muodostuvat puun epäorgaanisesta tuhka-aineksesta ja epätäydellisen palamisen lopputuotteista. Palamattomat tuhkakomponentit höyrystyvät osittain poltossa ja jäähtyessään tiivistyvät partikkeleiksi. Epätäydellisen palamisen lopputuotteet koostuvat liekissä syntyvistä nokihiuksasista ja orgaanisista kaasuista, jotka tiivistyvät tuhka- ja nokihiuksasten pinnalle. Nokihiuksasten pääkomponentti on mustahiili. Hiukkasten pinnoille tiivistyvistä orgaanisista ainesosista monet ovat terveydelle haitallisia, esim. polyaromaattiset hiilivedyt (PAH).

Edellä esitetyt hiukkasten muodostumis- ja muutuntaprosessit tapahtuvat tulipesässä sekä savukaasukanavassa ja välittömästi piipun pään jälkeen savukaasujen jäähtyessä ulkoilman lämpötilaan. Näitä hiukkasia kutsutaan primäärihiukkasiksi. Lisäksi ilmakehässä muodostuu nk. sekundäärihiukkasia tiivistymällä kaasusta, lähinnä rikin ja typen yhdisteistä (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>) sekä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (NMVOC). Tässä hankkeessa tarkasteltiin ja mallinnettiin vain primäärihiukkasten päästöjä, kulkeutumista ja vaikutuksia. Suomessa ulkoilman pienhiukaspitoisuuksista suurin osa on sekundäärihiukkasia, jotka ovat pääasiassa kaukokulkeutuneita Euroopasta ja Venäjältä.

Useimmat pienhiukkaset eli aerosolit heijastavat ilmakehässä auringonvaloa takaisin avaruuteen ja toimivat näin ilmastoa viilentävästi, mutta mustahiilellä on lämmittävä vaikutus. Se absorboi tehokkaasti auringonvaloa sekä ilmakehässä että maanpinnalla, ja vaikutus on erityisen suuri arktisilla alueilla lumitai jääpeitteen yllä, jolloin heijastuvuus muuttuu radikaalisti. Lisäksi aerosolit vaikuttavat ilmastoon pilvien muodostumisen ja niiden ominaisuuksien kautta. Useissa tutkimuksissa (mm. Jacobson 2001, Bond ym.

2013) mustahiili on arvioitu hiilidioksidin jälkeen merkittävämmäksi ilmasto lämmittäväksi päästökomponentiksi. Arktinen neuvosto on kartoittanut jäsenmaidensa puun pienpoltosta syntyviä mustahiilipäästöjä ja päästövähennysten mahdollisuutta hillitä arktista ilmastomuutosta (ACAP 2015)

### Tutkimuksen tavoite

Tässä tutkimuksessa arvioidaan puun pienpolton hiukkaspäästöjen kehitystä ja eri vähennyskeinojen vaikutuksia päästöihin Suomessa vuoteen 2030 mennessä. Vähennyskeinoina tarkastellaan kiinteän polttoaineen pienkattiloille ja tulisijoille hyväksytyjä ekosuunnitteluvaatimuksia ja kansallisia vaihtoehtoisia menetelmiä päästöjen vähentämiseksi. Lisäksi arvioidaan päästöjen ja päästövähennysten terveys- ja ilmastovaikutuksia sekä vähennystoimenpiteiden kustannuksia. Päästövähennyspotentiaalia tarkastellaan kolmessa skenaariossa, joissa ennuste puunkäytön kehityksestä vaihtelee.

## 2 Laskentametodit

### 2.1 Päästöjen laskenta ja huonon polton merkitys päästöissä

Hiukkaspäästöt ja niiden vähennyspotentiaali on laskettu SYKEN kansallisella FRES-ilmansaastemallilla (Karvosenoja 2008). Puunkäyttöennusteet perustuvat kansalliseen Energia- ja ilmastostrategiaan (TEM 2013) sekä historiatietoihin perustuviin asiantuntija-arvioihin puun käytön herkkyytarkastelun eri tapauksissa. Mallin aiemmat päästökertoimet pienpoltolle (Karvosenoja 2008) on hiljattain päivitetty Itä-Suomen yliopiston viimeisimpiin mittauksiin perustuen (UEF 2013). Uudistettu laskentamenetelmä pyrkii ottamaan huomioon tulisijojen käyttötavan ja polttoaineen vaikutuksen syntyviin päästöihin jakamalla käyttäjät erilaisiin profiileihin polttotavan laadun mukaan. Profiilijako on tehty nuohoojilta saadun palautteen avulla ja sen perusteella on arvioitu osuus huonolle poltolle, jossa palamatonta ainesta syntyy huomattavan paljon ja hiukkaspäästöt ovat korkeat. Määritelmällisesti huono poltto pitää sisällään useita tyypillisimpiä käyttäjän virheitä, mm. vääränlaisen tulipesän täytön ja sytytyksen, liian alhaisen palamisilman saannin ja huonolaatuisen polttoaineen käytön. Huonolle poltolle on määritetty erilliset päästökertoimet perustuen päästömittaustutkimuksiin (Frey ym. 2009, Schmidl ym. 2011) ja mittaajien asiantuntija-arvioihin (Tissari 2013). Polttotapojen profilointi kuvaa todellisuutta erittäin yksinkertaistetusti ja siihen sisältyy suuria epävarmuuksia, mutta se on kuitenkin huomionarvoinen ensiaskel huonon polton vaikutuksen arvioimiseksi läpinäkyvällä tavalla kansallisessa päästöinventaarissa. Taulukossa 1 on esitetty FRES-mallissa käytössä olevat PM2.5 ja BC päästökertoimet ja puun käyttömäärät vuodelle 2010. Taulukossa 2 on esitetty oletukset käyttäjäprofiilien määrittelyssä.

*Taulukko 1. FRES-mallissa käytössä olevat PM2.5 ja BC päästökertoimet (huonon polton vaikutukset huomioitu) ja puun käyttömäärät vuodelle 2010. Laitetyypit, joiden arvioidaan täyttävän Ecodesign-asetusten vaatimukset on esitetty kursivoituna.*

| Kattilat  | Puun käyttö<br>[PJ] | PM2.5<br>[mg/MJ] | BC<br>[mg/MJ] |
|---|---------------------|------------------|---------------|
| <i>Hakekattilat, automaattisyöttö</i>             | 12.1                | 16               | 1             |
| <i>Pellettikattilat, automaattisyöttö</i>         | 1.3                 | 20               | 1             |
| Manuaalikäyttöiset klapikattilat vesivaraajalla   | 10.6                | 135              | 24            |
| Manuaalikäyttöiset klapikattilat, ei vesivaraajaa | 2.9                 | 700              | 210           |
| <i>Manuaalikäyttöiset modernit klapikattilat</i>  | 0                   | 17               | 1             |
| <b>Tulisijat</b>                                  |                     |                  |               |
| Avotakat ja luokittelemattomat                    | 2                   | 638              | 37            |
| <i>Liedet</i>                                     | 6.1                 | 53               | 34            |
| Perinteiset varaavat takat                        | 12.9                | 136              | 47            |
| <i>Modernit varaavat takat</i>                    | 1.1                 | 48               | 19            |
| <i>Varaavat leivinuunit</i>                       | 10.5                | 48               | 15            |
| Saunakiukaat                                      | 8.9                 | 470              | 182           |
| Modernit saunakiukaat                             | 0                   | 235              | 91            |
| Perinteiset kamiinat                              | 1.6                 | 113              | 28            |
| <i>Modernit kamiinat</i>                          | 0                   | 72               | 18            |

*Taulukko 2. Arvio huonon polton osuudeksi tulisijojen käyttäjillä*

| Käyttäjaprofiilit            | Käyttäjien osuus | Huonon polton osuus |
|------------------------------|------------------|---------------------|
| Hyvä käyttö                  | 55 %             | 0 %                 |
| Kohtalainen käyttö           | 30 %             | 10 %                |
| Huono käyttö                 | 15 %             | 50 %                |
| Huonon polton osuus yhteensä |                  | <b>10.5%</b>        |

## 2.2 Vähennyskeinot ja laskentaparametrit

### *Ecodesign-asetukset*

Ecodesign-asetukset koskevat uusia, markkinoille tulevia kiinteän polttoaineen tulisijoja (< 50 kW) ja kiinteän polttoaineen lämmityskattiloita (< 500 kW). Tulisijoille asetus tulee voimaan vuonna 2022 ja kattiloille 2020. Tässä selvityksessä molempien on kuitenkin oletettu tulevan voimaan vasta 2022. Tulisijojen asetuksen piiriin eivät kuulu saunakiukaat ja itse muuratut tulisijat, joita ei ole toimitettu yhden valmistajan tarjoamana kokonaisuutena.

Päästörajoiden taustalla olevassa testausmenetelmässä tulisija lämmitetään kuumaksi ja palaminen on jo kunnolla käynnistynyt ennen mittausten aloittamista. Lisäksi hiukkaset mitataan kuumista savukaasuista ilman laimennusta, jolloin merkittävä osa savukaasun jäähtyessä syntyvistä hiukkasista jää mittaamatta. FRES-mallin päästökertoimet taas perustuvat kotimaisiin mittaustutkimuksiin, joissa pyritään simuloimaan normaalikäytön päästöjä ottamalla mittaukseen mukaan myös sytytysvaiheen päästöt sekä jäähtyvässä savukaasukanavassa tiivistyvät hiukkaset. Ecodesign-asetusten pienpolttolaitteiden hiukkaspäästörajat on esitetty taulukossa 3.

*Taulukko 3. Ecodesign-asetusten mukaiset hiukkaspäästörajat kattiloilla (10% O<sub>2</sub>) ja tulisijoille (13% O<sub>2</sub>), mitattuna kuumista savukaasuista\**

| Tuote                   | PM mg/m <sup>3</sup> |
|-------------------------|----------------------|
| Kattila                 | 20                   |
| Suljettu takka tai uuni | 40                   |
| Avotakka                | 50                   |

\*lisäksi Ecodesign-asetus pitää sisällään päästörajat toisenlaiseen, Norjassa kehitettyyn tulisijojen mittaustapaan pohjautuen. Tässä tulisija pakotetaan toimimaan neljällä eri teholla kitupoltosta hyvin nopeaan palamiseen. Tällainen testausjärjestely sopii erityisen huonosti Suomessa käytettäville varaaville tulisijoille, eikä sen ilmoittamia päästöarvoja ole siitä syystä käsitelty tässä raportissa.

Erilaisista mittaustavoista johtuen Ecodesign-asetusten päästökertoimet eivät ole suoraan verrattavissa mallissa käytettyihin kertoimiin, joiden katsotaan kuvaavan paremmin poltosta syntyviä todellisia päästömääriä. Asetusten voimaantulon vaikutus on laskettu siten, että FRES-mallin neljästätoista kattilaja takkatyyppistä on valittu asiantuntija-arviona laitteet, jotka voisivat päästä ehdotuksen päästörajoihin, ja vain niitä jää markkinoille vuoden 2022 jälkeen (kts. Taulukko 1). Muut lämmittimet poistuvat laitekannasta, kun niiden käyttöikä on lopussa. Vähennyskustannukset tulevat uusien laitteiden hankinnasta ja ottavat huomioon käyttökustannukset ja hyötysuhteen vaikutuksen polttoainekuluihin. Modernit kattilat ja tulisijat poikkeavat perinteisistä malleista lähinnä kehittyneemmän ilmansyötön ja palotilan mitoituksen suhteen, jolloin hyötysuhde on korkeampi ja päästöt pienemmät. Toisaalta hankintahinta on moderneilla laitteilla korkeampi.

### *Muut vähennyskeinot*

Ecodesign-asetusten lisäksi arvioitiin kolmea muuta vähennyskeinoa:

- Päästövaatimukset uusille saunakiukaille (50 % alempi päästökerroin perinteisiin kiukaisiin verrattuna), alkaen vuodesta 2022.
- Sähkösuodatinten asentaminen pienkattiloihin, sekä saastuttavimpien, ilman vesivaraajaa toimivien manuaalikäyttöisten kattiloiden kieltäminen
- Informaatiokampanja hyvistä puunpolttokäytännöistä, joilla voisi vähentää epätäydellisestä palamisesta syntyviä päästöjä

## Kustannusparametrit

Tarkasteltujen päästövähennystoimien kustannuksia arvioitiin peruslinjan mukaisen puunkäyttökehityksen tapauksessa. Pienpolttolaitteille oletetut hyötysuhteet, laitteiden investointikustannukset ja keskimääräiset käyttöiät on esitetty taulukossa 4. Investointien koroksi on oletettu 4 % ja takaisin maksuajaksi 10 vuotta saunakiukailla sekä kamiinoilla, 20 vuotta muilla polttolaitteilla ja 15 vuotta sähkösuodattimella. Lisäksi on arvioitu käyttökustannukset polttolaitteille (Sternhufvud ym. 2004) ja sähkösuodattimille (Lenz ym. 2008). Polttopuiden keskihinnaksi on otettu 71 €/ton, jossa oletetaan valtaosan puusta tulevan markkinoiden ulkopuolelta (Halkoliiteri 2011).

Vähäpäästöisempiä moderneja saunakiukaita on jo ollut markkinoilla, mutta korkeamman hinnan vuoksi niiden myynti on ollut vähäistä. Laitteille ei löytynyt mitattuja hiukkaspäästökertoimia, mutta asiantuntija-arvioihin (mm. Tissari, Harvia) ja muihin laitetietoihin pohjautuen varovaiseksi arvioksi asetettiin puolet perinteisen kiukaan päästökertoimesta.

*Taulukko 4. Kustannusarvioissa käytettyjä laskentaparametreja (Rouvinen ym. 2011, Hulkkonen & Rautanen 2004)*

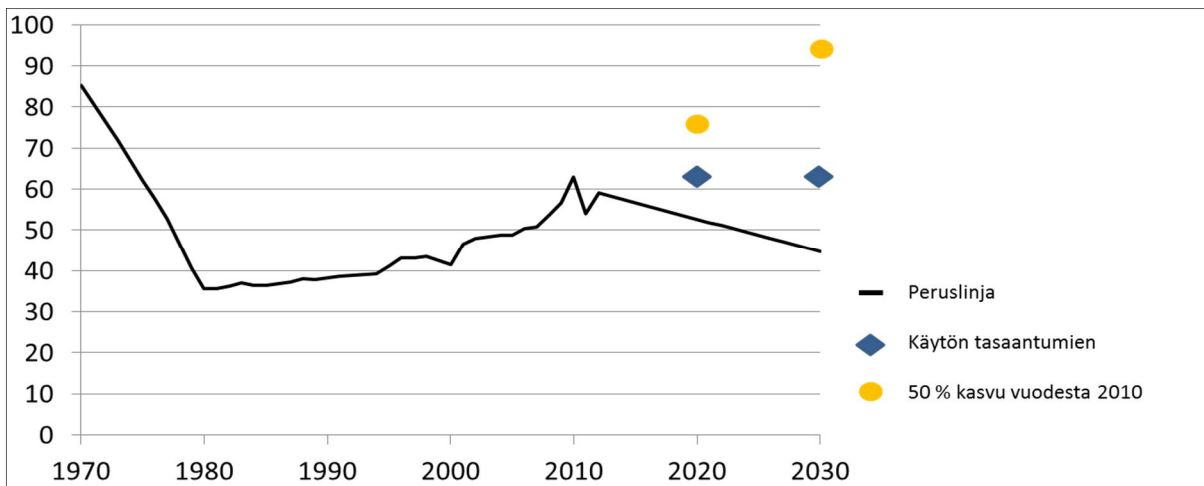
| Laite                       | Hyötysuhde | Investointi-kustannus [€] | Keskimääräinen käyttöikä [a] |
|-----------------------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| Moderni klapikattila        | 0.9        | 9000                      | 30                           |
| Klapikattila vesivaraajalla | 0.88       | 6000                      | 30                           |
| Perinteinen varaava takka   | 0.75       | 4000                      | 35                           |
| Moderni varaava takka       | 0.85       | 6000                      | 35                           |
| Perinteinen kamiina         | 0.45       | 400                       | 12.5                         |
| Moderni kamiina             | 0.6        | 600                       | 20                           |
| Perinteinen saunakiuas      | 0.45       | 400                       | 12.5                         |
| Moderni saunakiuas          | 0.6        | 800                       | 20                           |
| Sähkösuodatin               | 80 %*      | 1000                      | -                            |

\*erotustehokkuus hiukkasille

Informaatiokampanjan vaikutusta tarkasteltiin kolmen erilaisen kattavuustason kautta. Ensimmäisessä vaikutus ulottuu kaikkiin Suomen tulisijoihin, toisessa vain asuintaloihin ja kolmannessa vain asuintaloihin kunnissa, joissa on yli 20 000 asukkaan keskus. Hinta-arvio perustuu HSY:n pääkaupunkiseudulla järjestämään kampanjaan, ja siihen sisältyy informaatiolehtisten toimitus, painatus ja jakelu sekä yleisötilaisuuksien järjestäminen. Talokohtaiseksi hinnaksi kampanjassa arvioitiin 0.31€ (Maria Myllynen, henk. koht tiedonanto. 2013). Tämä arvio on luultavasti alakanttiin koko Suomen tulisijoihin sovellettuna, sillä harvemmin asutuilla alueilla keskimääräiset kustannukset kasvavat. Toisaalta vuosikustannuksia laskettaessa on oletettu, että kampanja järjestetään joka vuosi, kun se todellisuudessa ajaisi todennäköisesti saman asian järjestettynä muutaman vuoden välein. Informaatiokampanjan vaikuttavuutta tarkasteltiin herkkyystarkastelun keinoin niin, että informaatiokampanjan huonoa polttoa vähentävälle vaikutukselle arvioitiin ylempi ja alempi arvio: 50 % ja 5 %, vastaavasti. Informaatiokampanjoiden vaikuttavuudesta on olemassa erittäin vähän tietoa ja siitä syystä arvioita kannattaa pitää vain suuntaa antavina. HSY on arvioimassa pääkaupunkiseudulle tekemänsä kampanjan vaikuttavuutta ja tämä saattaa tuoda asiaan lisävalaistusta tulevaisuudessa.

## *Puun käytön herkkyystarkastelut*

Energia- ja ilmastostrategian tarkennetussa perusskenaariossa kotitalouksien puulämmityksen oletetaan pysyvän noin nykytasolla (2011) vuoteen 2020 asti ja laskevan siitä vuoteen 2030. Polttopuun määrä kotitalouksissa on kuitenkin ollut tasaisessa kasvussa 1980-luvulta lähtien ja kasvu on vielä kiihtynyt 2000-luvulla, joten oletus käyttömäärän tasaantumisen ja kääntymisen laskuun lähitulevaisuudessa voi olla epärealistinen. Tutkimuksessa tarkastellaan myös kahta muuta skenaariota, jossa puun pienpoltto ei laske peruslinjan mukaisesti. *Käytön tasaantuminen* skenaariossa käyttömäärät pysyvät vuoden 2010 tasolla. Taustaoletuksena on, että puunpolton suosio kasvaa samalla vauhdilla kuin 1900-luvun lopussa mutta rakennusten energiatehokkuus paranee 15 % nykyisestä. *Jatkuva kasvu* skenaariossa puun käyttömäärät jatkavat kiihtynyttä kasvua, ja rakennusten energiatehokkuuden parantumisesta huolimatta polttopuun käyttö nousee 50 % vuodesta 2010 vuoteen 2030.



Kuva 3. Asuin- ja palvelurakennusten puun pienkäyttö (Tilastokeskus 2013) ja kehitys peruslinjassa sekä vaihtoehtoskenaarioissa [PJ].

### 3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

#### 3.1 Potentiaali päästövähennyksille

Vuoden 2030 kumulatiiviset päästövähennyspotentiaalit tarkastelluille toimenpiteille on esitetty kuvassa 4 ja yksittäisille toimille yksityiskohtaisemmin myöhemmin taulukossa 6. Taulukossa 5 on lisäksi esitetty polttolaittekohtaiset puun käyttömäärät ja päästöt vuosina 2010 ja 2030. Laitekannan uudistumisesta johtuen koko pienpolttosektorin keskimääräinen PM<sub>2.5</sub>-päästökerroin laskee merkittävästi jo ilman Ecodesign-asetuksia tai lisätoimia, 171 mg/MJ:sta vuonna 2010 137 mg/MJ:een vuonna 2030. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että erityisesti varaavilla tulisijoilla modernien vähäpäästöisten mallien markkinat ovat merkittävät jo tällä hetkellä ja näiden on oletettu tulevaisuudessa edelleen yleistyvän laitekannassa ilman Ecodesign-asetustakin. Lisäksi kaikkein saastuttavimpien ilman varaajaa toimivien klapi-kattiloiden määrän on oletettu vähenevän tulevaisuudessa merkittävästi.

Pelkän Ecodesignin päästövähennysvaikutus puun pienpolton kokonaispäästöistä olisi vain 6 % pienhiukkasille ja 4 % mustahiillelle, johtuen asetuksen soveltamisalassa olevien laitteiden pitkästä käyttöikästä ja osan laitteista kohdalla jo nykyisin alhaisista päästöistä. Monilla polttolaitteilla on pitkä käyttöikä, jolloin vuonna 2022 voimaantulevaksi oletetun Ecodesignin vaikutus ei näy erityisen voimakkaasti vielä 2030. Lisäksi varaavien takkojen kohdalla modernien laitteiden osuus on ollut nousussa ilman lainsäädäntöäkin, jolloin Ecodesign vain hieman nopeuttaisi oletettua muutosta. Suurin osa (60–70 %) Ecodesignin päästövähennysvaikutuksista tulisi kattilakannan modernisoitumisesta, loput tulisijojen modernisoitumisesta.

Saunakiukaiden vaihtuvuus on kattiloita ja uuneja nopeampaa ja niillä on myös korkeat päästökertoimet. Saunakiukaat tuottavat noin 35 % kaikista puun pienpolton PM<sub>2.5</sub> hiukkaspäästöistä ja 45 % mustahiilipäästöistä vuonna 2010. Osuudet kasvavat vuonna 2030 46 ja ja 56 %:iin, vastaavasti. Ecodesignin lisäksi oletetut päästövaatimukset uusille kiukaille nostaisivat pienhiukkasten ja mustahiilen päästövähennysprosentit 25 % ja 27 %:iin pienpolton kokonaispäästöistä, vastaavasti. Saunakiukailla on uuneja ja kattiloita lyhyempi käyttöikä sekä suuri vaikutus päästöihin, joten niille suunnattu lainsäädäntö toisi merkittäviä päästövähennyksiä jo vuoteen 2030 mennessä. Perustuen kunkin laitetyypin uusiutumisenopeuteen Suomen polttolaitteikannassa, tarkastellut laitevaatimukset (Ecodesign ja vaatimukset saunakiukaille) lisäisivät modernien laitteiden määrää 30 prosenttiyksikköä klapi-kattiloissa, 7 varaavissa takkoissa ja 70 sekä kamiinoissa että kiukaissa. Näistä laitetyppeistä ainoastaan moderneja varaavia takkoja on jo nyt käytössä ja markkinoilla merkittäviä määriä, ja niiden osuuden on oletettu lisääntyvän myös ilman uutta lainsäädäntöä.

Informaatiokampanjan potentiaali päästövähennyksissä on arvioitu melko rajalliseksi. Hyvänä puolena informaatiokampanjoissa on, että niillä pystytään vaikuttamaan jo olemassa olevan laitekannan päästöihin ja lisäksi nopeammin kuin laitestandardeilla. Niitä pystytään myös kohdistamaan taajama-alueille, joissa pienpolto on yleisintä ja päästövähennyksillä suurimmat terveyshyödyt. Informaatiokampanjat ovat myös suhteellisen edullisia toteuttaa.

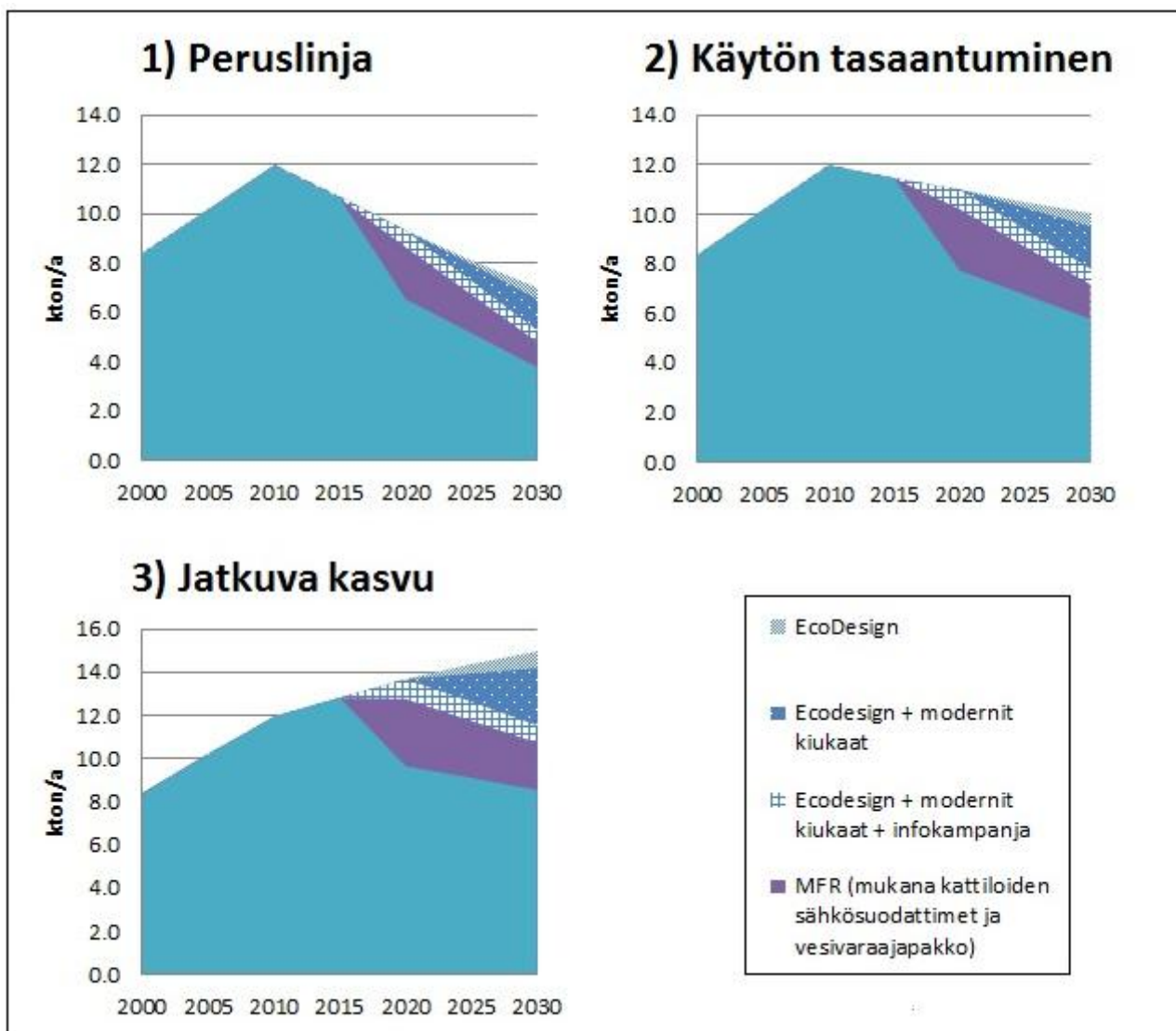
Kattiloille kohdistetuista lisätoimenpiteistä sähkösuodatinten asentaminen vastaisi noin 75 % saavutetuista päästövähennyksistä ja vesivaraajapakko 25 %. Ilman vesivaraajaa toimivien klapikattiloiden määrän on oletettu laskevan ilman toimenpiteitäkin erittäin pieneksi vuoteen 2030 mennessä, jolloin niiden käyttökiellon vaikutus ei olisi yhtä merkittävä kuin jos se otettaisiin käyttöön heti.

Kaikkien tarkasteltujen toimenpiteiden kokonaisvaikutus pienhiukkasvähennyksiin olisi skenaariosta riippuen 3 100–6 400 t/a, joka vastaa 17–24 %:a Suomen arvioiduista pienhiukkasten kokonaispäästöistä vuonna 2030. Puun pienpoltto tulee olemaan selvästi suurin hiukkaspäästösektori tulevaisuudessa, joten siihen kohdistetuilla toimenpiteillä on myös suurin päästövähennyspotentiaali. Vaikka uusia laitteita koskevan lainsäädännön vaikutus näkyy hitaasti, tuottaisi koko laitekannan modernisointi 60 % vähennykset Peruslinjaan verrattuna sekä PM2.5- että mustahiilipäästöille. Tulos osoittaa, että polttolaitteita koskeva lainsäädäntö on tärkeä askel kohti ympäristöystävällisempää puun pienpoltoa. Lisäksi herkkyytarkastelu puun käytöstä osoittaa, että teknisten toimenpiteiden lisäksi myös puun käyttömäärien kehitys tulevaisuudessa on avainasemassa.

*Taulukko 5. Polttolaitetyyppikohtaiset puun käyttömäärät ja päästöt vuosina 2010 ja 2030 Peruslinjassa. Luvuissa on mukana kaikki puun pienpoltto (asuin-, vapaa-ajan-, palvelu-, maatalous- ja teollisuusrakennukset).*

|                              | 2010               | 2010                 | 2010              | 2030               | 2030                 | 2030              |
|------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|
|                              | Puun käyttö [PJ/a] | PM2.5-päästö [ton/a] | BC-päästö [ton/a] | Puun käyttö [PJ/a] | PM2.5-päästö [ton/a] | BC-päästö [ton/a] |
| Varaavat tulisijat           | 24.5               | 2306                 | 786               | 19.8               | 1559                 | 535               |
| Saunakiukaat                 | 8.9                | 4184                 | 1621              | 6.8                | 3211                 | 1244              |
| Liedet, kamiinat ja avotakat | 9.7                | 1778                 | 323               | 4.7                | 640                  | 149               |
| Klapikattilat                | 25.6               | 3652                 | 869               | 16.0               | 1452                 | 286               |
| Pellettikattilat             | 1.3                | 26                   | 1                 | 3.4                | 67                   | 2                 |
| <b>YHTEENSÄ</b>              | <b>70</b>          | <b>11 950</b>        | <b>3600</b>       | <b>50.7</b>        | <b>6930</b>          | <b>2220</b>       |





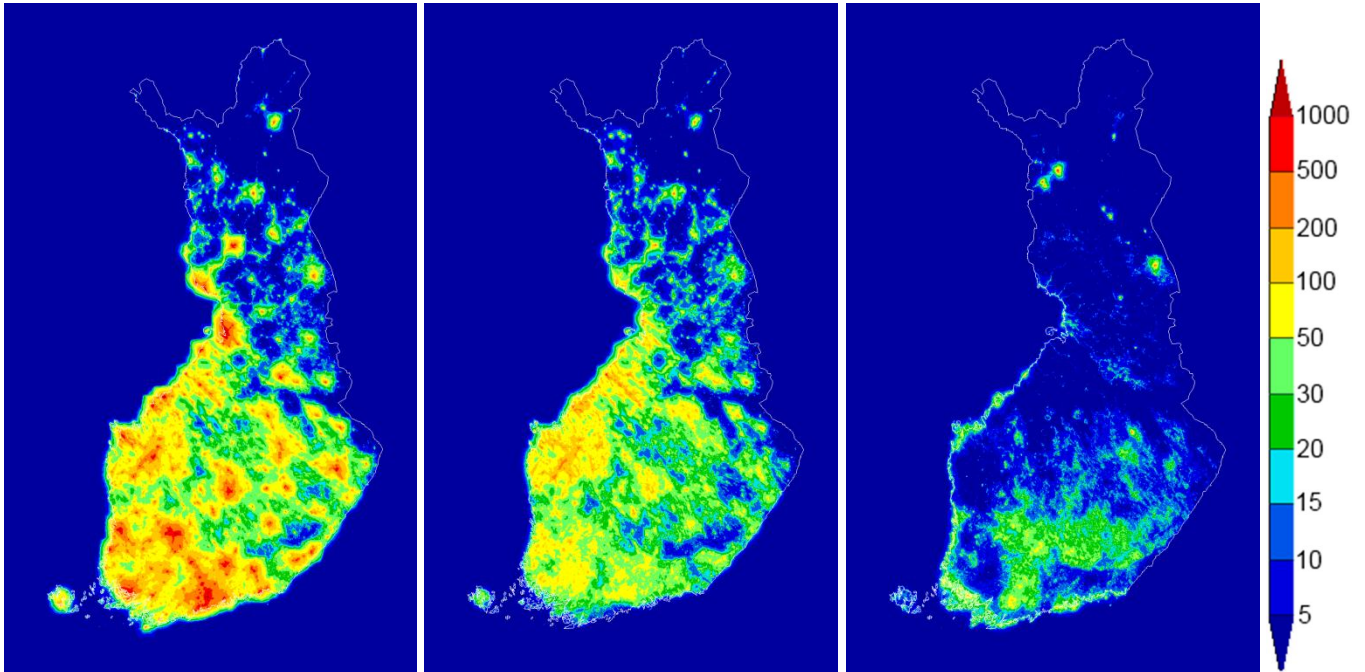
Kuva 4. Kumulatiiviset  $PM_{2,5}$ -vähennyspotentiaalit toimenpiteille vuosina 2020 ja 2030 tarkastelluissa puunkäytöskenaarioissa (MFR = Maximum Feasible Reduction). Informaatiokampanjoille esitetty vähennyspotentiaali vastaa arvon ylärajaa (50 % vähennemä huonossa poltossa). Päästöluvuissa on mukana kaikki puun pienpoltto (asuin-, vapaa-ajan-, palvelu-, maatalous- ja teollisuusrakennukset).

### 3.2 Vaikutukset väestön altistumiseen pienhiukkasille

Pienhiukkasten ( $PM_{2,5}$ ) aiheuttamia terveyshaittoja pidetään yleisesti ilmansaasteiden merkittävimpana vaikutuksena. Ihmisten keuhkoihinsa hengittämät pienhiukkaset aiheuttavat laajan kirjon vaikutuksia lievistä ärsytysoireista sydän- ja hengityselinsairauksien pahenemiseen (Hänninen ym. 2010). Pienhiukkasten on todettu olevan yhteydessä kuolleisuuteen ja sydän- ja verisuonitauteihin sekä lyhyellä (24 tuntia) että pitkällä (vuositaso) aikavälillä. Tarkkaa tietoa terveyshaittojen aiheuttajasta pienhiukkasissa tai kaikista vaikutusmekanismeista ei ole. Terveysvaikutusten on todettu olevan selvemmin yhteydessä polttoperäisiin pienhiukkasiin kuin mitattuihin massaperusteisiin hiukkasmääriin, ja nokihiukkaset (mustahiili) voivat toimia kantajina useille palamisprosesseissa muodostuville haitallisille aineille, kuten PAH-yhdisteille tai raskasmetalleille. Pitkäaikaisaltistuksesta johtuvien kansanterveysvaikutusten merkittävyyttä voidaan arvioida mallitarkasteluilla, joissa otetaan huomioon päästötasot, päästöjen leviäminen ja väestön sijaintitieto.

Tarkasteltujen skenaarioiden primääristen pienhiukaspäästöjen ( $PM_{2,5}$ ) vaikutuksia aiheutuviin ulkoilmapitoisuuksien vuosikeskiarvoihin ja väestöaltistukseen arvioitiin 1 km alueresoluutiolla SYKE:n FRES-mallinnuksella. Mallissa arvioidaan pienpolton päästöjen alueellinen jakauma erikseen asuinrakennusten tulisijoille ja pienkattiloille sekä vapaa-ajan rakennusten tulisijojen puun käyttö. Asuinrakennusten puun käyttöarvioissa otetaan lisäksi huomioon eri taajamaisuusasteiden (pääkaupunkiseutu, yli 20 000 asukkaan keskustaajamat, alle 20 000 asukkaan keskustaajamat, haja-asutusalueet, maatilat) erilaiset keskimääräiset puun käyttömäärät. Rakennusten tyyppi- ja sijaintitiedot perustuvat Rakennus- ja huoneistorekisteriin (RHR) ja keskimääräiset puunkäyttömäärät METLA:n

kyselytutkimuksiin. Päästöjen leviämisen arvioinnissa hyödynnetään Ilmatieteen laitoksen kanssa yhteistyössä kehitettyjä pienhiukkasten leviämismatriiseja. Kuvassa 5 on esitetty mallinnetut primääriset PM2.5 pitoisuudet erikseen asuinrakennusten tulisijoille ja puukattiloille sekä vapaa-ajan rakennuksille. Nähdään, että pitoisuudet painottuvat hyvin eri tavalla kolmella eri puun käyttötavalla. Asuinrakennusten tulisijat sijaitsevat huomattavissa määrin kaupunkien pientaloalueilla, kun taas puukattiloita käytetään pääasiassa haja-asutusalueilla. Myös puukiukaiden käyttö on varsin yleistä kaupunkialueilla (Gröndahl ym. 2011). Noin 20 % käytöstä tapahtuu vapaa-ajan rakennuksissa. Yksityiskohtaista alueellista tietoa eri laitetyyppien sijainnista ei ole olemassa ja FRES-mallissa asuinrakennusten tulisijojen päästöjen alueellinen jakauma on sama kiukaille ja muille tulisijoille.



Kuva 5. Mallinnetut primääri PM2.5 pitoisuuksien vuosikeskiarvot vuonna 2030 Peruslinjassa (a) asuinrakennusten tulisijoista, (b) asuinrakennusten puukattiloista ja (c) vapaa-ajan rakennusten tulisijoista. Yksikkö  $\text{ng}/\text{m}^3$ .

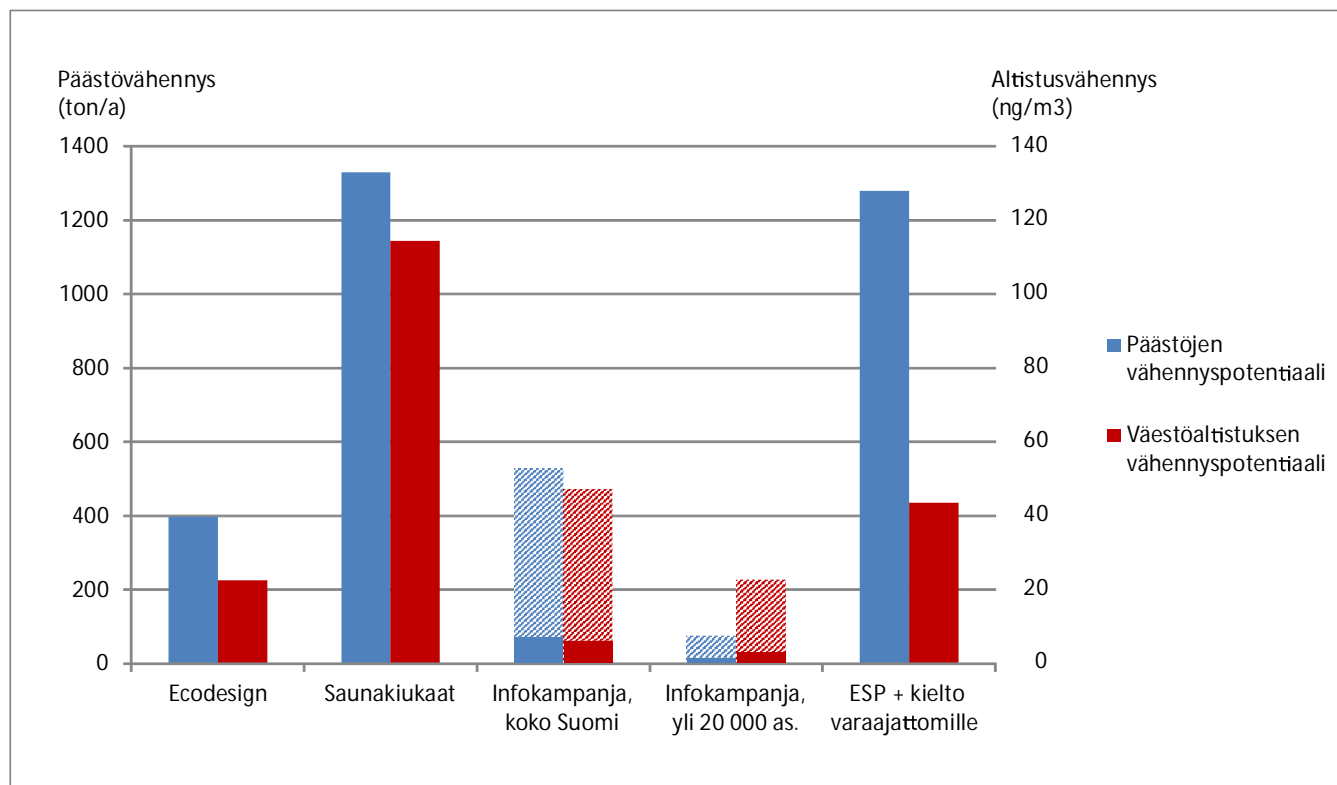
Kun yhdistetään kuvan 5 mallinnettu pitoisuustieto väestön sijaintitietoon, voidaan laskea Suomen primäärihiukkaspäästöjen aiheuttamat väestöpainotetut pitoisuudet, jotka kuvaavat vaikutuksia väestöaltistukseen. Taulukossa 6 on esitetty kolmen käsitellyn puunkäyttötavan ja yksittäisten päästövähennystoimien päästövähennyspotentiaalit ja vaikutukset väestöaltistukseen. Kuvassa 6 on esitetty vastaavat tiedot lisäksi graafisessa muodossa Peruslinjan mukaiselle puun käyttömäärälle. Nähdään, että paitsi päästöjen, myös väestöaltistuksen vähentämisen kannalta saunakiukaiden modernisointi olisi tehokkain keino. Klapi-kattiloille kohdistetuilla toimilla savukaasujen puhdistamiseksi voidaan saavuttaa vastaavat päästövähennykset, mutta väestöaltistuksen vähentämisessä kattiloille kohdistetut toimet eivät ole yhtä tehokkaita. Informaatiokampanjoiden päästömääriä vähentävä vaikutus ei luultavasti ole kovin merkittävä, mutta niillä pystytään vaikuttamaan erityisesti kaupunkialueiden päästöihin ja siten informaatiokampanjat voivat olla tehokkaita terveysvaikutusten kannalta. Voidaan esimerkiksi nähdä, että yli 20 000 asukkaan keskustajamien kuntiin kohdistetut informaatiokampanjat voisivat rajoittaa väestöaltistusta enimmillään jopa yhtä paljon kuin Ecodesign-asetukset vuonna 2030.

Ilmanlaadun kokonaisuutta arvioitaessa on tärkeä pitää mielessä, että esitetyt mallinnukset eivät pidä sisällään sekundäärihiukkasten eikä kaukokulkeuman vaikutusta. Suomessa kaukokulkeutuneet pienhiukkaset, jotka ovat pääasiassa sekundäärihiukkasia, vastaavat yli puolesta kokonaispitoisuuksista. Keskimääräinen väestöpainotettu pitoisuus ulkoilman kaikille pienhiukkasille Suomessa on nykyään noin  $8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (de Leeuw ja Horálek 2009) ja vuonna 2030 pitoisuuksien arvioidaan vielä laskevan tästä (Suoheimo ym. 2015). Tämän perusteella voidaan sanoa, että puun pienpoltto voisi vastata tästä karkeasti arvioiden noin yhtä kymmenesosaa. Tässä tarkastelluista toimista saunakiukaiden modernisoinnilla voitaisiin siis vähentää väestöaltistusta suuruusluokaltaan noin 2 %. Vastaavasti informaatiokampanjoiden koko maan potentiaaliksi arvioitiin suuruusluokaltaan 0,1 – 1 % vähennys väestöaltistuksessa.

Taulukko 6. Yksittäisten toimien potentiaalit päästöjen ja väestöaltistuksen rajoittamisessa vuonna 2030 verrattuna tilanteeseen, jossa ei tehdä lisätoimenpiteitä. Koskee vain asuin- ja vapaa-ajanrakennuksia.

| Puunkäyttöskenaario/toimenpide   | PM <sub>2.5</sub> päästö [ton/a] | Mustahiili päästö [ton/a] | PM <sub>2.5</sub> väestöaltistus [ng/m <sup>3</sup> ]* |
|--|----------------------------------|---------------------------|--|
| <b>1) Peruslinja</b>   | <b>6820</b>                      | <b>2210</b>               | <b>530</b>   |
| EcoDesign  | -400                             | -90                       | -23  |
| Vaatimukset saunakiukaille   | -1330                            | -520                      | -110   |
| Informaatiokampanja tulisijan käytöstä, koko Suomi (-5...-50 %)                              | -53...-530                       | -8...-80                  | -5...-47   |
| Informaatiokampanja, yli 20 000 asukkaan keskustaaajaman sisältävät kunnat (-5...-50 %)      | -8...-77                         | -1...-12                  | -2...-23   |
| Sähkösuodatin pienkattiloihin ja ilman vesivaraajaa toimivien klapi-kattiloiden käyttökielto | -1190                            | -250                      | -43  |
| <b>2) Käytön tasaantuminen</b>   | <b>9810</b>                      | <b>2990</b>               | <b>770</b>   |
| EcoDesign  | -500                             | -120                      | -33  |
| Vaatimukset saunakiukaille   | -1750                            | -680                      | -160   |
| Informaatiokampanja tulisijan käytöstä, koko Suomi (-5...-50 %)                              | -72...-720                       | -11...-110                | -7...-68   |
| Informaatiokampanja, yli 20 000 asukkaan keskustaaajaman sisältävät kunnat (-5...-50 %)      | -10...-100                       | -2...-16                  | -3...-33   |
| Sähkösuodatin pienkattiloihin ja ilman vesivaraajaa toimivien klapi-kattiloiden käyttökielto | -1630                            | -340                      | -63  |
| <b>3) Jatkuva kasvu</b>  | <b>14730</b>                     | <b>4490</b>               | <b>1180</b>  |
| EcoDesign  | -790                             | -180                      | -51  |
| Vaatimukset saunakiukaille   | -2630                            | -1020                     | -250   |
| Informaatiokampanja tulisijan käytöstä, koko Suomi (-5...-50 %)                              | -100...-1040                     | -15...-150                | -10...-100   |
| Informaatiokampanja, yli 20 000 asukkaan keskustaaajaman sisältävät kunnat (-5...-50 %)      | -15...-150                       | -2...-22                  | -5...-51   |
| Sähkösuodatin pienkattiloihin ja ilman vesivaraajaa toimivien klapi-kattiloiden käyttökielto | -2450                            | -500                      | -96  |

\*Väestöpainotettu pitoisuus (koko Suomen mallinnettu pitoisuuskenttä painotettuna väestötiheydellä kussakin 1 km ruudussa)



Kuva 6. Yksittäisten toimien potentiaalit päästöjen ja väestöaltistuksen rajoittamisessa Peruslinjan mukaisella puunkäytöllä vuonna 2030 verrattuna tilanteeseen, jossa ei tehdä lisätoimenpiteitä. Viivoitettu alue edustaa informaatiokampanjan 5–50 % huonoa polttoa vähentävää vaikutusta.

### 3.3 Vaikutukset ilmastoon

Puun poltosta syntyy useita lyhytikäisiä ilmastoon vaikuttavia päästöjä (SLCP = Short Lived Climate Pollutants), kuten mustahiili, orgaaninen hiili, metaani, haihtuvat orgaaniset yhdisteet, hiilimonoksidi ja typenoksidit. Näiden vaikutusta säteilypakotteeseen voidaan karkeasti arvioida global warming potential (GWP) -kertoimilla (taulukko 7). Puun pienpoltosta syntyvät SLCP-päästöt on esitetty taulukossa 8. Tarkastellut päästöt poistuvat ilmakehästä verrattain nopeasti, joten niiden vaikutus näyttäytyy suurempana lyhyen aikavälin tarkastelussa. Kahdenkymmenen vuoden yli laskettu GWP-arvo antaa noin kolminkertaisen vaikutuksen verrattuna sadan vuoden tarkasteluun (taulukko 9). GWP 20 -kertoimilla puun pienpolton päästöt hiilidioksidiekvivalenteina olisivat vuonna 2010 noin 10 % Suomen raportoiduista kasvihuonekaasupäästöistä, ja skenaariosta riippuen noin 10–20 % vuonna 2030.

Pienpolton lyhytikäisillä ilmastovaikutteisilla päästöillä on siis olennainen ilmasto lämmittävä vaikutus, jota voisi vähentää verrattain nopeasti päästöjen alentamisen myötä. Ottamalla käyttöön kaikki selvityksessä esitetyt toimenpiteet saavutettaisiin puun pienpolton SLCP-päästöissä (taulukossa 7 esitetyt päästökomponentit) noin 40 % vähenemä hiilidioksidiekvivalenteiksi laskettuna vuonna 2030 sekä Peruslinjassa että Jatkuvan kasvun skenaariossa.

Taulukko 7. GWP-arvot GAINS-mallista (Amann ym. 2011)

| Ilmansaaste | GWP20 | GWP100 |
|-------------|-------|--------|
| BC          | 2200  | 680    |
| OC          | -240  | -69    |
| CH4         | 72    | 25     |
| CO          | 4.5   | 1.9    |
| VOC         | 12    | 3.4    |

Taulukko 8. Pienpoltosta syntyvät ilmastoon vaikuttavat ilmansaastepäästöt Peruslinja-skenaariossa ilman päästövähennystoimenpiteitä [t/a]

| Vuosi | BC   | OC   | CH4  | VOC   | CO     | NOx  |
|-------|------|------|------|-------|--------|------|
| 2010  | 3600 | 3230 | 8370 | 18800 | 205900 | 9560 |
| 2020  | 2850 | 2510 | 7000 | 15800 | 170700 | 8290 |
| 2030  | 2220 | 1810 | 5660 | 13100 | 135300 | 7110 |

Taulukko 9. YK:n ilmastopimuksen alaisuudessa raportoitavat kasvihuonekaasupäästöt ja ilmastovaikutteiset ilmansaasteet (Mt CO<sub>2</sub>-ekv)

|   | 2010   |         | 2020   |         | 2030   |         |
|---|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
|   | GWP 20 | GWP 100 | GWP 20 | GWP 100 | GWP 20 | GWP 100 |
| Suomen kasvihuonekaasupäästöt   | 88     | 75      | 74     | 63      | 53     | 45      |
| Ilmastoon vaikuttavat ilmansaasteet pienpoltosta Peruslinjassa ilman päästövähennystoimenpiteitä                | 8.8    | 2.9     | 7      | 2.3     | 5.5    | 1.8     |
| Ilmastoon vaikuttavat ilmansaasteet pienpoltosta Jatkuvan kasvun skenaariossa ilman päästövähennystoimenpiteitä | 8.8    | 2.9     | 10.4   | 3.3     | 11     | 3.5     |

Verrattuna varsinaisiin kasvihuonekaasuihin, SLCP-päästöjen elinikä on lyhyt ja sekoittuminen ja kulkeutuminen ilmakehässä on rajallista. Täten päästölähteen sijainnilla on suuri merkitys ilmastovaikutuksen kannalta, ja globaalit, keskiarvoistetut vaikutuskertoimet voivat aliarvioida vaikutusta erityisesti pohjoisilla leveysasteilla. Esimerkiksi mustahiilen vaikutus säteilytasapainoon kasvaa lumi- ja jääpeitteisellä alueella, jossa se vähentää auringonvalon heijastuvuutta huomattavasti. Paremman kuvan saamiseksi tarvittaisiin paikallisempaa ja vuodenaikaan sidottua tarkastelua. Suomen osalta talviaikaisilla päästöillä näyttäisi olevan selvästi suurempi ilmastovaikutus kuin kesällä tapahtuvilla päästöillä (Laaksonen ym. 2013).

### 3.4 Päästövähennystoimenpiteiden kustannukset

Tarkasteltujen päästövähennystoimien kustannuksia arvioitiin Peruslinjan mukaisen puunkäyttökehityksen tapauksessa. Toimenpiteiden vuosikustannukset ja yksikkökustannukset päästö- ja altistusvähennyksille on esitetty taulukossa 9.

Ecodesign -asetusten ja saunakiuasvaatimusten tapauksissa kustannukset koostuvat perinteisiä laitteita korkeammista investointikustannuksista sekä säästöstä polttoainekustannuksissa korkeamman hyötysuhteen ansiosta. Kattiloiden ja saunakiukauden modernisointitoimet ovat päästövähennyksen kannalta kustannustehokkaimpia. Jos kustannustehokkuutta sen sijaan tarkastellaan väestöaltistuksen vähentämisen kannalta, kattilat eivät ole niin edullisia, koska toimet kohdistuisivat pääasiassa haja-asutusalueille.

Informaatiokampanja on kustannustehokkuudeltaan erinomainen, vaikka oletettaisiin alhainen, vain 5 %:n huonoa polttoa vähentävä vaikutus. Informaatiokampanjalla voidaan lisätä kansalaisten tietoisuutta useista päästöjä lisäävistä ja energiatehokkuutta heikentävistä tekijöistä, kuten vääristä polttotekniikoista ja huonolaatuisesta polttoaineesta. Erityisesti suurimmille kaupunkialueille toteutettuna informaatiokampanja on edullinen keino ilmanlaadun parantamisessa ja väestöaltistuksen vähentämisessä. Kuitenkin kampanjan vaikuttavuudesta ja kustannustehokkuudesta esitettyihin arvioihin liittyy merkittäviä epävarmuuksia. Informaatiokampanjan vaikutusta päästöihin on vaikea mitata, ja koko maan kattavaa kampanjaa ei ole koskaan toteutettu Suomessa. Kampanjan tehon ylärajaksi arvioitu 50 %:n vähenemä huonossa poltossa on erittäin optimistinen oletus.

Kattiloihin kohdistetuista toimista vesivaraajien asentaminen vanhoihin varaajattomiin klapi-kattiloihin on hyvin edullinen toimi kitupolton ja päästöjen vähentämisessä. Arvioon toimen päästövähennyspotentiaalista tulevaisuudessa liittyy kuitenkin merkittäviä epävarmuuksia (mm. kuinka laajasti varaajattomia kattiloita on käytössä tulevaisuudessa ja käytännön rajoitteet vesivaraajien jälkiasennuksille). Kokonaiskustannuksiltaan kallein toimenpide on sähkösuodatinten asentaminen, ja se on myös yksikkökustannuksiltaan kalleimmasta päästä. Arvio on tosin riippuvainen laitteen kustannusoletuksesta, johon sisältyy paljon epävarmuutta, sillä tekniikkaa ei ole vielä käytössä kaupallisessa mittakaavassa.

*Taulukko 9. Päästövähennyskustannukset vuonna 2030*

| Toimenpide   | Vuosikustannus [M€a] | Päästövähennyksen yksikkökustannus [k€ton] |        | Altistusvähennyksen yksikkökustannus [k€(ng/m <sup>3</sup> )] |
|--|----------------------|--|--------|---|
|  |                      | PM <sub>2,5</sub>                          | BC     | PM <sub>2,5</sub>   |
| Ecodesign  | 14                   | 35   | 150    | 620   |
| -kattilat  | 4                    | 15   | 75     | 440   |
| -varaavat takat  | 8                    | 100  | 310    | 1100  |
| -kamiinat  | 2                    | 30   | 130    | 340   |
| Saunakiukaat   | 22                   | 17   | 43     | 190   |
| Informaatiokampanja, koko Suomi (5–50 %)*  | 0.3                  | 0.6 – 6                                    | 4 – 37 | 6 – 64  |
| Informaatiokampanja, vain yli 20 000 asukkaan keskustaajaman sisältävät kunnat (5–50 %)*     | 0.08                 | 1 – 10                                     | 7 – 66 | 3 – 35  |
| Sähkösuodatin pienkattiloihin ja ilman vesivaraajaa toimivien klapi-kattiloiden käyttökielto | 44                   | 29   | 150    | 850   |
| -vesivaraajien asentaminen   | 1                    | 3  | 9      | 90  |
| -sähkösuodattimet  | 43                   | 45   | 250    | 1300  |

\*huonon polton vähenemä informaatiokampanjan vaikutuksesta 5 – 50 %

### 3.5 Muita mahdollisia päästövähennyskeinoja

Tulisijojen käyttö on mahdollista myös muuten kuin polttamalla polttopuita perinteiseen tapaan tulipesässä. Takkoihin ja uuneihin on mahdollista asentaa joko suoraan tai jälkikäteen pelletti-insertti, jossa polttoaineena toimivat pelletit, tai kaasutuspöytä, jossa pilkkeet ensin kaasutetaan ja kaasu poltetaan. Molempia laitteita valmistetaan Suomessa, ja näillä teknologioilla hiukkaspäästöt ovat tyypillisesti huomattavasti alhaisemmat kuin poltettaessa polttopuuta perinteisessä tulipesässä. Laitteille ei kuitenkaan ollut saatavilla mittauksia hiukkaspäästöistä.

Tulipesissä on myös mahdollista käyttää sähkösuodattimia samoin kuin pienkattiloissa, mutta niiden vähäisen käytön takia päästövähennyskustannukset nousisivat korkeammiksi kuin pienkattiloilla (Savolahti ym. 2014).

Vaihtoehtoisena keinona laitevaatimuksille saunakiukaiden laitekannan uudistamiseksi, valtion tai kunnan avustus uusissa investoinneissa voisi olla mahdollinen keino, olettaen että markkinoilta löytyy vähäpäästöisiä kiukaita useamman valmistajan tarjoamana. Varaavien takkojen osalta vastaava avustuskampanja on arvioitu kalliiksi ja hitaaksi keinoksi vaikuttaa päästöihin (Savolahti ym. 2014).

Polttolaitteisiin ja –tapoihin kohdistuvien keinojen lisäksi on mahdollista vähentää päästöjä rajoittamalla puun polttoa kielloilla. Joillain Euroopan suurkaupunkialueilla (esim. Pariisi) puun poltto on kielletty joko kokonaan tai tietyn tyyppisillä laitteilla. Lisäksi voidaan rajoittaa puun polttoa esim. säätilan mukaan, silloin kun on inversiotilanne eli savukaasut eivät sekoitu kunnolla ylempiin ilmakerrokseen. Tämän tyyppisiä keinoja on käytössä Euroopassa lähinnä liikenteen rajoituksina. Kiellot voisivat olla keinona yleisen hyväksyttävyyden kannalta haastavia esimerkiksi lämmitystarpeen ollessa suurinta talvella, jolloin myös esiintyy yleisesti inversiotilanteita, joissa ilmansaasteiden laimeneminen on heikkoa.

Muissa Pohjoismaissa käytössä olevista pienpolton päästövähennyksiin tähtäävistä keinoista löytää tietoa raportista Levander & Bodin (2014).

### *3.6 Päästöjen ja vähennystoimenpiteiden arviointiin liittyviä epävarmuuksia*

Puun pienpolton päästöjen arviointi on useissa tutkimuksissa (mm. Karvosenoja ym. 2008, Fontoukis ym. 2014) havaittu haastavaksi johtuen mm. vaihtelevasta laitekannasta, kattavien laiterekisterien puutteesta, käyttäjän suuresta vaikutuksesta päästöihin ja polttoaineen hankinnasta epäkaupallisista lähteistä. Tästä syystä myös yleisesti puun pienpolton päästöepävarmuudet ovat suuremmat kuin monilla muilla merkittävillä päästösektoreilla. Suomessa on tehty vuosia tutkimustyötä pienpolton päästömittauksien, puun ja polttolaitteiden käytön selvitysten sekä arviointikehikoiden kehittämisen parissa, mikä on omalta osaltaan parantanut arvioiden luotettavuutta ja sovelluskelpoisuutta. Karvosenoja ym. (2008) arvioi puun pienpolton PM<sub>2.5</sub> Suomen päästöarvion epävarmuudeksi -36 % ... +50 % (95 % luottamusväli). Tämän arvion jälkeen päästölaskenta on muuttunut lähinnä tässä raportissa esitellyn huonon polton arvion osalta. Kuitenkin aiemman arvion (Karvosenoja ym. 2008) voidaan ajatella edustavan myös nykyistä päästöarvion epävarmuutta

Tämän selvityksen hyödynnettävyyden kannalta on oleellista arvioida eri esitettyjen vähennystoimenpiteiden tehokkuuteen ja toteutettavuuteen liittyviä epävarmuuksia. Ecodesign-asetusten osalta vaikutukset päästöihin vuoteen 2030 arvioitiin melko vähäisiksi, joten myöskään esitettyjen arvioiden epävarmuudet eivät ole kokonaisuuden kannalta merkittäviä. Ecodesign-asetusten täytäntöönpano sen sijaan aiheuttaa rasitetta suomalaisille tulisija- ja kattilavalmistajille liittyen mm. vaadittuihin testausmenetelmiin ja –standardeihin. Lisäksi asetuksen voimaantulo saattaa muuttaa jossain määrin ihmisten käyttäytymistä, mikä lisää epävarmuutta tulevaisuuden päästöennusteiden taustaoletuksissa. Uusien tuotevaatimustenmyötä halvimmat polttolaitteet luultavasti häviäisivät markkinoilta, joka saattaisi aiheuttaa nykyisten laitteiden käyttöiän pidentymistä, tai tulisijojen tapauksessa lisätä itse rakennettujen takkojen ja uunien osuutta. Joka tapauksessa modernit polttolaitteet ovat käyttäjä- ja naapuriystävällisempiä, kuluttavat vähemmän puuta ja kestävät käytössä pitempään.

Tämän selvityksen tarkastelluista päästövähennyskeinoista merkittävin vähennyspotentiaali arvioitiin puukiukaille. Tähän arvioon liittyy kuitenkin merkittäviä epävarmuuksia. Perinteisten kiukaiden päästökertoimista on melko paljon mittaustuloksia olemassa, jotka osoittavat kiukaat suhteellisen suuripäästöisiksi verrattuna esimerkiksi varaaviin tulisijoihin. Myös kiukaiden puun käyttömääräarviot ovat suhteellisen varmalla pohjalla. Sen sijaan nykyisten markkinoilla olevien kiukaiden päästötasoista on epävarmuutta. Mm. kiuasvalmistajilta ja nuohoojilta on saatu sen suuntaista viestiä, että nykyiset markkinoilla olevat kiukaat ovat ainakin osittain jo hieman tehokkaampia kuin perinteiset mallit, joihin siis tämän selvityksen tulevaisuusennustekin perustuu. Ts. vuoden 2030 päästöarviot, joissa ei ole kiukaille suunnattuja lisätoimia mukana saattavat olla tältä osin yliarvioita. Toinen merkittävä epävarmuuden lähde on mittaustietojen puute tässä selvityksessä oletettujen vähäpäästöisten kiukaiden osalta. Oletettu 50 % alenema päästökertoimissa verrattuna perinteiseen kiukaaseen on varovainen arvio. Jotta puukiukaiden päästöarvion ja vähennyspotentiaalın luotettavuutta saataisiin parannettua, olisi tärkeä käynnistää yhteistyöhankkeita päästömittaajien ja kiuasvalmistajien kanssa.

Informaatiokampanjoiden vaikuttavuudesta ihmisten käyttäytymiseen on toistaiseksi hyvin vähän tietoa ja näin ollen vaikutusta päästöihin on vaikea arvioida. Kansainvälisesti joitain yksittäisiä arvioita on, vaikkakin niiden yleistettävyyys Suomen oloihin on kyseenalaista johtuen mm. erilaisesta laitekannasta ja



polttotavoista. Monissa maissa käytetyt kamiinatyyppiset tulisijat on helpompi vaihtaa kuin Suomessa tyypilliset raskastekoiset varaavat tulisijat. Lisäksi kamiinatyyppisissä laitteissa ei usein ole lämpöä varaavia ominaisuuksia ja siten niiden käyttö kitupolttamalla on huomattavan yleistä. Environment Canadan yhteisötyöpajoihin perustuneen ”Burn It Smart” -kampanjan tuloksena 73 prosenttia yleisötapahtumaan osallistuneista muutti puunpolttokäytäntöjään paremmiksi. Osallistuneista 34 prosenttia uusi tulisijojaan, joista 90 prosenttia EPA-hyväksytyiksi. Myös pohjoismaisessa arvioreportissa (Levander & Bodin 2014) todetaan, vaikkakin ilman määrällisiä arvioita, että säännöllisin väliajoin toteutetut informaatiokampanjat ovat nopea ja kustannustehokas keino pienpolton hiukkas- ja nokipäästöjen vähentämisessä.

Sähkösuodatinten käytöstä pienkattiloissa on vain niukasti tietoa. Vaikka suodattimien käytöstä on saatu testiolosuhteissa hyviä tuloksia, sisältyy käyttövarmuuteen, erotustehokkuuteen ja hintaan paljon epävarmuuksia. Myöskin käytön valvonta olisi hankalaa, ellei sähkösuodatin tule valmiiksi kiinteänä osana kattilakokonaisuutta. Ilman vesivaraajaa toimivien manuaalikäyttöisten kattiloiden kieltämisen vaikutukset ovat myös tapauskohtaisia. Usein vesivaraajan lisäämiselle ei ole tilaa, jolloin käytännössä uuden kattilan ostaminen olisi helpompi vaihtoehto. Lisäksi näitä kattiloita käytetään tyypillisesti haja-asutusalueilla, jolloin päästöjen alenemisen vaikutus terveyshyötyihin voisi jäädä vähäiseksi.

Yleisesti ottaen puunpoltolla on vahva asema suomalaisessa kulttuurissa ja kieltoihin perustuvat rajoitustoimet saivat luultavasti paljon vastustusta, ja sopisivat paremmin paikallisiksi ja tapauskohtaisiksi ratkaisuuksi.

#### 4 Yhteenveto

Puun pienpoltto on merkittävin pienhiukkasten ja mustahiilen päästöjen aiheuttaja Suomessa. Se on myös ainoita merkittäviä vielä toistaiseksi sääntelemättömiä päästölähteitä; teollisuuden, energiantuotannon ja liikenteen laitteet ja toiminta ovat olleet päästölainsäädäntöjen alaisena jo pitkään. Uusille myytävälle pienpolttolaitteille tulevat Ecodesign-asetukset tuovat päästövaatimukset ensimmäistä kertaa kansalliseen lainsäädäntöön. Säännökset eivät kuitenkaan koske saunakiukaita, joiden osuus pienhiukkasten ja mustahiilen päästöistä on suuri.

Tässä raportissa tarkasteltiin Ecodesign-asetusten tuottamia päästövähennyksiä, vaikutusta väestöaltistukseen pienhiukkasille ja mustahiilen ilmastovaikutuksiin. Lisäksi tarkasteltiin muiden pienpolton päästörajoituskeinojen mahdollisuuksia. Kaikille keinoille arvioitiin myös niiden käyttöönotosta aiheutuvia kustannuksia sekä kustannustehokkuutta päästöjen ja väestöaltistuksen vähentämisessä.

Laitekannan jatkuvasta uudistumisesta johtuen koko pienpolttosektorin keskimääräinen  $PM_{2.5}$ -päästökerroin laskee merkittävästi jo ilman lisätoimia ja Ecodesign-asetusten vaikutuksia, 171 mg/MJ:sta vuonna 2010 137 mg/MJ:een vuonna 2030. Ecodesignin päästöjä vähentävä vaikutus on Suomessa melko hidas johtuen yleisimpien polttolaitteiden, varaavien tulisijojen pitkästä käyttöiästä ja laitekannan hitaasta uudistumisesta. Lisäksi asetukset eivät koske kaikkia merkittäviä polttolaitetyyppejä, kuten saunakiukaita ja itsemuurattuja takkoja. Vuonna 2030 Ecodesign vähentäisi puun pienpolton kokonaispäästöjä vain 6 % pienhiukkasille ja 4 % mustahiilelle.

Ecodesign-asetusten ulkopuolella olevat saunan puukiukaat ovat päästöjen kannalta merkittävin yksittäinen polttolaitetekategoria Suomessa, vastaten puun pienpolton  $PM_{2.5}$ -päästöistä noin 35 % ja mustahiilipäästöistä 45 % vuonna 2010. Päästövaatimukset uusille myytävälle kiukaille rajoittaisivat päästöjä suhteellisen tehokkaasti ja nopeasti johtuen perinteisten kiukaiden korkeista päästöistä ja lyhyestä käyttöiästä. Tässä raportissa tarkasteltu kiukaiden päästövaatimus (50 % alemmat päästökertoimet verrattuna perinteiseen kiukaaseen) toisi 20 ja 23 % päästövähennykset pienhiukkasille ja mustahiilelle, vastaavasti, vuonna 2030. Kiukaiden tulevaisuuden päästöarvioihin liittyy kuitenkin merkittäviä epävarmuuksia johtuen mittaustietojen puutteesta vähäpäästöisille kiukaille.

Polttolaitteen lisäksi pienpolton päästötason vaikuttaa merkittävästi myös tulisijan käyttäjän toiminta. Taitamattomasti käytetty tulisija aiheuttaa moninkertaiset päästöt verrattuna asianmukaiseen käyttöön. Käyttäjille ja nuohoojille suunnattujen kyselyjen sekä huonon polton päästömittausten perusteella huonon polton vaikutukset lisättiin laskentaan ja arvioitiin, että tulisijojen taitamaton käyttö vaikuttaa merkittävästi päästöihin. Huonon polton päästöjen vähentämiseksi potentiaalisimmaksi keinoksi arvioitiin informaatiokampanjat tulisijojen oikeista käyttötavoista, vaikka informaatiokampanjoiden vaikuttavuus on

epävarma ja päästöjä vähentävä vaikutus luultavasti melko rajallinen, kampanjat ovat kuitenkin edullisia toimia ja hyvin kustannustehokkaita erityisesti paikallisen ilmanlaadun parantamisessa. Informaatiokampanja on myös lainsäädäntöä joustavampi työkalu, joka on mahdollista kohdistaa erityisille ongelma-alueille ja sen vaikutus voi realisoitua nopeasti.

Kattilakannan uusimisen lisäksi tarkasteltiin savukaasujen puhdistamiseen kohdistuvia toimia, kuten sähkösuodatinten käyttöä ja vesivaraajan asentamista kattiloihin, joissa se on mahdollista. Omakotikokoluokan sähkösuodatinten ongelmana on korkea hinta ja epävarmuudet käytettävyyden ja huoltotarpeiden suhteen. Kaupallisen tason teknologiaa on tällä hetkellä vielä hyvin vähän.

Raportissa tarkasteltiin myös päästövähennysten tuomia hyötyjä ihmisten terveydelle. Mallintamalla pienhiukkasten väestöaltistusta voitiin vertailla eri keinojen suhteellisia tehokkuuksia kansanterveydelle aiheutuvien haittojen vähentämisessä. Varsinaisiin terveysvaikutusten laatuun tai absoluuttisiin määriin tämä raportti ei anna vastauksia. Päästövähennysten suhteelliset terveyshyödyt ovat merkittävästi suuremmat, jos toimet on mahdollista rajata koskemaan vain tiheästi asuttuja seutuja. Yllä esitetyistä informaatiokampanjat ovat tyypillisesti paikallisesti toteutettuja ja on siten mahdollista kohdistaa erityisesti kaupunkien pientaloasukkaille. Jos informaatiokampanjoita toteutettaisiin samansisältöisinä ja hyödyntäen jo olemassa olevaa aineistoa, voisi toimenpiteellä olla kustannustehokkaita positiivisia vaikutuksia kunnissa, joissa puun pienpolton haitat on tunnistettu. Puun pienpoltto kaupunkien pientaloalueilla tapahtuu pääosin muuta lämmitystä täydentävänä lämmityksenä varaavissa tulisijoissa talviaikaan, joten Ecodesign-asetuksen tuomat päästövähennykset erityisesti tulisijoille vähentävät väestöaltistusta tehokkaasti. Myös puukiukaiden käyttö on yleistä kaupunkialueilla, joten saunan kiukaiden modernisointi tuo myös terveystieteestä merkittävää hyötyä. Puukattiloita käytetään pääasiassa maaseudulla ja harvaan asutuilla alueilla, joten niihin suunnattujen toimenpiteiden päästövähennykset tuovat huomattavasti alempia terveyshyötyjä vähennettyä päästöyksikköä kohden. Myöskään vapaa-ajan rakennuksiin kohdistetut päästövähennykset eivät ole erityisen tehokkaita terveystieteestä.

Mustahiilen ja muiden pienpoltosta syntyvien lyhytikäisten ilmaston vaikuttavien ilmansaasteiden merkittävyttä ilmaston lämpenemiseen arvioitiin GWP-kertoimien avulla. Tarkastellut päästöt poistuvat ilmakehästä verrattain nopeasti, joten ilmastovaikutus korostuu lyhyemmällä tarkasteluvälillä. GWP 20 -arvoilla laskettuna pienpolton SLCP-päästöt tuottavat lämmittävän ilmastovaikutuksen, joka vastaa noin 10 %:a YK:n ilmastopöytäkirjan alaisuudessa raportoiduista Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (CO<sub>2</sub>-ekv) vuonna 2010. Ottamalla käyttöön kaikki tässä raportissa tarkastellut vähennyskeinot puun pienpolton SLCP-päästöt (CO<sub>2</sub>-ekv) laskisivat noin 40 % (GWP 20) vuonna 2030, verrattuna tilanteeseen jossa ei tehdä toimenpiteitä. Globaalien GWP-kerrointen käyttö Suomen leveyspiireillä saattaa aliarvioida ilmastovaikutusta, jossa depositiolla lumiselle pinnalle on suuri merkitys. Paremmalla kuvalla ilmastovaikutuksista saamiseksi tarvittaisiin paikallisempia laskentaparametreja ja vuodenaikaan sidottua tarkastelua.

## 5 Johtopäätökset

Ecodesign-asetusten vaikutus Suomen puun pienpolton pienhiukkasten ja mustahiilen päästöihin on suhteellisen vähäinen vuonna 2030, johtuen varaavien tulisijojen pitkästä käyttöiästä ja siitä, että perinteisetkään varaavat tulisijat eivät ole kovin saastuttavia. Ecodesign-asetusten ansiosta päästöt vähenisivät Energia- ja ilmastostrategian Tarkennetun Perusskenaarion mukaisen puun käytön kehityksen tapauksessa 400 tonnia pienhiukkasille ja 90 tonnia mustahiilelle (2 % ja 3 % Suomen kokonaispäästöistä, vastaavasti).

Puukiukaat on merkittävin polttolaitetyyppi pienhiukkasten ja mustahiilen päästöjen suhteen vastaten noin 35 % ja 45 % puun pienpolton kokonaispäästöistä, vastaavasti. Puukiukaille suunnatut Ecodesign-asetuksen tyypiset vaatimukset vähentäisivät päästöjä merkittävästi. Tässä selvityksessä arvioidulla 50 % alemmalla päästökertoimella perinteisiin kiukaisiin verrattuna kokonaispäästöt vähenisivät 1300 tonnia pienhiukkasille ja 520 tonnia mustahiilelle vuonna 2030 (7 % ja 18 % Suomen kokonaispäästöistä, vastaavasti). Väestöaltistuksen rajoittamisessa pienhiukkasille saunakiukaiden modernisointi vastaisi noin 2 % alenemaa väestöpainotteisessa pitoisuudessa.

Puun pienpoltossa käyttäjän toiminnalla on merkittävä vaikutus päästöihin. Taitamattomalla käytöllä ja huonolaatuisella polttoaineella päästöt ovat moninkertaiset asialliseen polttoon verrattuna. Käyttäjän



toimista johtuvien päästöjen vähentämiseksi suositeltava ja edullinen keino on kansalaisille kohdistettavat informaatiokampanjat. Näiden päästöjä vähentävä vaikutus arvioitiin suhteellisen pieneksi (0,3 – 3 % pienhiukkasten ja mustahiilen kokonaispäästöistä Suomessa), mutta erityisesti kohdistettaessa kaupunkialueille toimien kustannustehokkuus väestöaltistuksen vähentämisessä on erittäin hyvä.

Lähdeviitteet:

ACAP 2015. Reduction of Black Carbon Emissions from Residential Wood Combustion in the Arctic Black Carbon Inventory, Abatement Instruments and Measures. Arctic Contaminants Action Program (ACAP). 161 pp. (julkaistaan toukokuussa 2015)

Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Høglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Nguyen, B., Posch, M., Rafaj, P., Sandler, R., Schöpp, W., Wagner, F., and Winiwarter, W. 2011. Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications, *Environmental Modelling & Software*, 26, 1489–1501, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.012>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815211001733>

Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G. and Zender, C. S. 2013 Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *JGR Atmospheres* 2013, 118, (11), 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171

Energiatilasto. 2011. Vuosikirja 2010. Tilastokeskus

Euroopan komissio. 2013. Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi tiettyjen ilman epäpuhtauksien kansallisten päästöjen vähentämisestä sekä direktiivin 2003/35/EY muuttamisesta COM(2013) 920 final.

Fountoukis, T. Butler, M.G. Lawrence, H.A.C. Denier van der Gon, A.J.H. Visschedijk, P. Charalampidis, C. Pilinis, S.N. Pandis. 2014. Impacts of controlling biomass burning emissions on wintertime carbonaceous aerosol in Europe. *Atmospheric Environment*, Volume 87, April 2014, Pages 175-182

Frey A. K., Tissari J., Saarnio K. M., Timonen H. J., Tolonen-Kivimäki O., Aurela M. A., Saarikoski S. K., Makkonen U., Hytönen K., Jokiniemi, J., Salonen R. O. & Hillamo R. E. J. 2009. Chemical composition and mass size distribution of fine particulate matter emitted by a small masonry heater. *Boreal Env. Res.* 14, 255–271. 2009

Gröndahl, T., Makkonen J., Myllynen M., Niemi J., Tuomi S. 2011. Tulisijojen käyttö ja päästöt pääkaupunkiseudun pientaloista. HSY raportti.

Halkoliiteri, 2011. [www.halkoliiteri.fi](http://www.halkoliiteri.fi)

Hilden M., Karvosenoja N., Koskela S., Kupiainen K., Liski J., Manninen K., Paunu V-V., Repo A. & Savolahti M. 2013. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian päivityksen ympäristövaikutusten arviointi. Suomen ympäristökeskus 19.3.2013

Hulkkonen S. & Rautanen J. Puun pienpolton päästövaatimukset. Taustaselvitys. Motiva. 2004.

Jacobson, M. Z. 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, 409, 695-697.

Karvosenoja N. 2008. Emission scenario model for regional air pollution. *Monographs Boreal Environ. Res.* 32. 2008.

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.

Laaksonen A., Kupiainen K., Kerminen V-M., Karvosenoja N., Pietikäinen J-P., Savolahti M., Paunu V-V., Savolainen I., Airaksinen M., Järvelä M., Kokko K., Kulmala M., Seppälä J. & Taalas P. Musta hiili ilmastopakotteena: päästöjen ja mahdollisten päästövähennysten globaalit ja alueelliset vaikutukset. Suomen ilmastopaneeli. Raportti. 2013

Lenz V., Thrän D., Hartmann H., Turowski P., Ellner-Schuberth F. & Gerth J. 2008. DBFZ Report Nr.1: Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen. Deutsches BiomasseForschungszentrum. 2008

Levander T. & Bodin S. 2014. Controlling Emissions from Wood Burning Legislation and Regulations in Nordic Countries to Control Emissions from Residential Wood Burning An examination of Past Experience. TemaNord 2014:517

Leeuw de F, Horalek J. Assessment of the health impacts of exposure to PM<sub>2.5</sub> at a European level. ETC/ACC Technical Paper 2009/1, June 2009.

Paunu V-V. Emissions of Residential Wood Combustion in Urban and Rural Areas of Finland. Diplomityö. 2012.

Rouvinen S., Ihalainen T. & Matero J. Pelletin tuotanto ja kotitalousmarkkinat Suomessa. Metlan työraportteja 183. 2011

Savolahti M., Karvosenoja K., Paunu V-V. & Kupiainen K. Reduction measures and mitigation scenarios for particulate emissions in Finnish residential wood combustion (FRES-DOMPM). Finnish Environment Institute. Käsikirjoitus. 2014

Schmidl C., Luisser M., Padouvas E., Lassenberger L., Rzaca M., Ramirez-Santa Cruz C., Handler H., Peng G., Bauer H., & Puxbaum H. 2011. Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. Atmospheric Environment 45 (2011) 7443-7454. 2011

Sternhufvud C., Karvosenoja N., Illerup J., Kindbom K., Lükewille A., Johansson M. & Jensen D. 2004. Particulate matter emissions and abatement options in residential wood burning in the Nordic countries. Nordic council of ministers. ANP 2004:735

Suoheimo P., Petäjä J., Savolahti M., Saarinen K., Grönroos J, Niko Karvosenoja, Silvo K., Forsius M., Vuorenmaa J. 2015. Selvitys päästökattodirektiiviehdotuksen sekä keskisuurten polttolaitosten direktiiviehdotuksen toimeenpanon vaikutuksista Suomessa (ISPA) (Julkaistaan keväällä 2015)

TEM. 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle. VSN 2/2013. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu. Energia ja ilmasto. 8/2013

Tissari J. 2013. Itä-Suomen yliopisto. Henkilökohtainen tiedonanto

UEF. 2013. Julkaisematon päästökerrointietokanta. Itä-Suomen yliopisto