

Sanna Syri & Antti Lehtilä

Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin



CLIMTECH

Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin

Sanna Syri ja Antti Lehtilä

VTT Prosessit

ISBN 951-38-6139-2 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6140-6 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2003

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Prosessit, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Processer, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Processes, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Syri, Sanna & Lehtilä, Antti. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin [The impacts of climate change mitigation on air pollutant emissions]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2186. 69 s.

Avainsanat air pollution, greenhouse gases, emissions reduction, environmental impacts, modelling, sulphur dioxide, nitrogen oxides, particulates, legislation, scenarios

Tiivistelmä

Tämän hankkeen tavoitteena oli selvittää lyhyen ja pitkän aikavälin (noin vuoteen 2030) keskeisimpien kasvihuonekaasujen vähennystoimien merkittävät suorat sivuvaikutukset muiden haitallisten aineiden ilmapäästöihin ja niiden aiheuttamiin ympäristöongelmiin. Työ tehtiin VTT Prosesseissa osana Tekesin CLIMTECH-teknologiaohjelmaa. Näkökulmina olivat suomalainen ja Euroopan laajuinen sekä globaali. Työn globaali osuus perustui kirjallisuuteen ja raportoituihin tutkimuksiin aiheesta. Työn Suomea koskevassa osassa käytettiin VTT:n EFOM-ENV-energiajärjestelmämallia arvioimaan, mitä muutoksia ilmansaasteiden päästöissä on odotettavissa kasvihuonekaasujen vähentämistoimenpiteiden myötä. Työssä laajennettiin EFOM-mallia kattamaan myös hiukkaspäästöjen laskenta. Lisäksi työssä päivitettiin jo olemassa olevat rikin ja typen oksidien mallinnukseen liittyvät laskentarutiinit ja tietokannat vastaamaan uusinta tietämystä rajoitustekniikoiden ominaisuuksista. Samoin huomioitiin uusimmat lisäykset ja muutokset ilmansaasteiden päästöjä koskevassa lainsäädännössä. EFOM-mallilla tarkasteltiin vuoteen 2030 ulottuvia skenaarioita. Mallilla laskettiin erilaisia energiajärjestelmän kehityspolkuja, joissa Suomen kasvihuonekaasujen päästöjä rajoitettiin mahdollisimman kokonaistaloudellisella tavalla. Malli laski samalla tapahtuvat muutokset muiden ilmansaasteiden päästöissä.

Mallitarkastelut osoittivat, että kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamistoimenpiteillä voidaan saavuttaa myös merkittäviä sivuhyötyjä muiden ilmansaasteiden päästöjen vähentämisessä. Skenaarioissa, joissa kasvihuonekaasujen vähentämistavoite oli -20 % vuoteen 2030 mennessä, rikkipäästöjen rakenteellinen vähenemä oli 11–16 % ja typen-oksidien rakenteellinen vähenemä oli 8–9 % verrattuna tilanteeseen, jossa Suomi toteuttaa vain Kioton pöytäkirjan. Pienhiukkasten kokonaispäästöjen kehityksessä rajoitustoimet erityisesti pienlähteissä ovat oleellisempia kuin lisärajoitukset tai rakenteelliset muutokset suuren mittakaavan energiantuotannossa. Suurimmat tulosten epävarmuudet ovat pienhiukkasten osalta pienlähteiden päästöjen keskimääräisessä nykytasossa ja tulevaisuuden kehityksessä. Koska eri lähteiden hiukkaspäästöt tunnetaan vielä puutteellisesti, on työn hiukkaspäästöjä koskevia tuloksia on pidettävä luonteeltaan alustavina.

Globaalisti kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämistoimet voivat aiheuttaa erittäin merkittäviä myönteisiä sivuvaikutuksia muiden ilmansaasteiden vähenemisenä ja siten paikallisen ja alueellisen ilmanlaadun paranemisena. Suurimmat suhteelliset hyödyt ovat odotettavissa kehittyvissä maissa, joissa käytössä olevaa vanhentunutta ja puutteellista tekniikkaa, kuten fossiilisia polttoaineita käyttäviä energiantuotanto- ja teollisuuslaitoksia ilman asianmukaista savukaasujen puhdistustekniikkaa, korvataan uudella, tehokkaammalla ja puhtaammalla teknologialla. Näitä ovat esimerkiksi korkean hyötysuhteen kaasu- tai biomassalaitokset ja muu uusiutuviin energianlähteisiin perustuva moderni teknologia. Myös energian tuotantoa ja käyttöä tehostavilla toimilla on vähentävä vaikutus ilmansaasteiden päästöihin niin kauan kuin energiaa tuotetaan päästöjä aiheuttavilla energiamuodoilla. Suurimmat kasvihuonekaasujen vähentämisen sivuhyödyt ovat olleet peräisin pienhiukkaspäästöjen vähenemisestä ja siten väestön terveyshaittojen pienemisestä. Koska haitallisille ilmansaasteille altistumisen on arvioitu aiheuttavan vuosittain kehitysmaissa lähes kolme miljoonaa ennen aikaista kuolemaa sekä erittäin laajoja haitallisia terveysvaikutuksia, voivat globaaleilla ilmastotoimilla lähivuosisikymmeninä saavutettavissa olevat konkreettiset sivuhyödyt väestön terveydelle olla erittäin merkittäviä. Paikallisesta näkökulmasta elinympäristön ja hengitysilmän puhdistuminen voi olla huomattavasti kasvihuonekaasujen vähenemistä merkittävämpi tekijä uuden teknologian kysynnässä ja käyttöönotossa.

Suomalaisen teknologian rooli voi viennin myötä olla huomattavasti merkittävämpi kuin sen rooli ainoastaan kotimarkkinoilla. Suomalainen osaaminen erityisesti kehittyneissä bioenergian hyödyntämistekniikoissa, yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa biopolttoaineilla sekä tuulienergiateknologiassa tarjoaa hyvät lähtökohdat globaalien markkinaosuuksien kasvattamiseen ilmastonmuutoksen torjunnan ja puhtaamman teknologian kysynnän luomilla markkinoilla. Ilmastomyötäisen teknologian on laajalti menestyäkseen kyettävä vähentämään myös muiden ilman epäpuhtauksien päästöjä. Tämä pätee erityisesti EU:n markkinoilla, jossa monissa maissa on jo käytössä tiukat päästömääräykset myös biomassan pienkäytölle.

Syri, Sanna & Lehtilä, Antti. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin [The impacts of climate change mitigation on air pollutant emissions]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2186. 69 p.

Keywords air pollution, greenhouse gases, emissions reduction, environmental impacts, modelling, sulphur dioxide, nitrogen oxides, particulates, legislation, scenarios

Abstract

This paper presents the results of an assessment done in the context of the Climtech Technology Programme. The purpose of the study was to examine the side effects of greenhouse gas control measures on the emissions of other harmful air pollutants (so-called ancillary benefits). The viewpoints considered were both national scale in Finnish conditions, as well as European and global. The global assessment was based on existing literature and recent scientific findings reported. The national scale study was done with the help of energy system modeling. The EFOM-ENV model available at VTT was expanded by adding modules for the calculation of particulate emissions. In addition, the existing routines and databases for the calculation of sulphur and nitrogen oxides in the EFOM model were updated to correspond to the latest status of reduction technologies and recent amendments in emission control legislation. Scenario studies extending to the year 2030, assuming various levels of greenhouse gas emission reductions, were performed with the EFOM model. The EFOM model was used to find the cost-optimal ways for achieving the specified greenhouse gas emission reductions, and the model calculated the simultaneous changes occurring in the emissions of other air pollutants.

The model studies for the Finnish energy system indicated that significant ancillary benefits in air pollution reduction can be achieved. A -20% greenhouse gas cutback requirement by the year 2030 from the 1990 level yielded a simultaneous reduction of 11–16% in sulphur emissions and a 8–9% reduction in nitrogen oxides emissions, compared to a situation where Finland would fulfill the Kyoto protocol requirement of emission stabilisation at 1990 level. The largest uncertainties in the results lie in the average present level and the future reduction possibilities of fine particle emissions from small-scale combustion. Reduction measures of particulate emissions especially from small-scale combustion determine the future development of total national particulate emissions far more than structural changes in large-scale energy production, which already executes effective emission control.

The results obtained for Finland are in accordance with corresponding studies from other regions indicating significant ancillary benefits in reduced air pollution. As the general recognition of the health hazards of air pollution is growing, this may actually promote significantly the export opportunities of advanced Finnish technological knowledge and energy technologies, offering solutions also for, e.g., local air pollution. Especially in developing countries, the significant improvements in local environmental conditions achieved with cleaner technology may actually be more decisive implementation factors than greenhouse gas reductions.

Alkusanat

Tämä raportti esittelee VTT Prosesseissa tehdyn selvityksen, joka toteutettiin osana Tekesin Teknologia ja ilmastonmuutos -teknologiaohjelmaa (CLIMTECH). Ohjelman tavoitteena oli edistää ilmastonmuutoksen hillintää sekä kansallisten ja kansainvälisten päästörajoitustavoitteiden saavuttamista tukemalla ilmastonmuutosta rajoittavan teknologian valintoja, tutkimusta, kehitystä, kaupallistamista ja käyttöönottoa. Tässä raportissa esitellyn selvityksen tavoitteena oli arvioida lyhyen ja keskipitkän aikavälin (noin vuoteen 2030) keskeisimpien kasvihuonekaasujen vähennystoimien suorat sivuvaikutukset muiden haitallisten aineiden ilmapäästöihin ja niiden aiheuttamiin ympäristöongelmiin. Työssä selvitettiin, mitkä ilmastonmuutoksen hillintätoimet voivat lisätä muita haitallisia päästöjä ja mitkä teknologiat puolestaan edistävät myös muiden ympäristöongelmien vähentämistä. Tämä tieto on tarpeellista ilmastonmuutoksen torjuntatoimien suunnittelussa, sillä kattava tieto puhtaampien teknologioiden myönteisistä vaikutuksista edistää näiden teknologioiden käyttöönottoa ja valintojen ohjautumista joka suhteessa optimaalisiin teknologioihin ja ratkaisuihin. Työ tehtiin VTT Prosesseissa vuoden 2002 aikana.

Tämän työn johtoryhmänä toimi CLIMTECH-ohjelman ohjausryhmä, jonka puheenjohtajana toimi johtava teknologia-asiantuntija Raija Pikku-Pyhältö Tekesistä. Ohjausryhmän muina jäseninä toimivat teknologia-asiantuntijat Sami Tuhkanen ja Teija Lahti-Nuutila Tekesistä, teollisuusneuvos Sirkka Vilkamo sekä ylitarkastaja Timo Ritonummi kauppa- ja teollisuusministeriöstä, yli-insinööri Risto Kuusisto, ylitarkastaja Teemu Virtanen sekä ylitarkastaja Pirkko Heikinheimo ympäristöministeriöstä, johtaja Kari Saviharju Andritz OY:stä ja tutkimusprofessorit Allan Johansson, Ilkka Savolainen sekä Kai Sipilä VTT Prosesseista. Ohjausryhmän sihteerinä toimi tutkija Mikael Ohlström VTT Prosesseista. Tekijät esittävät lämpimät kiitoksensa työhön saaduista kommentteista ja evästyksistä.

Tekijät esittävät lämpimät kiitoksensa myös seuraaville VTT Prosessien asiantuntijoille: erikoistutkija Päivi Aakko, tutkija Jouko Hepola, johtava tutkija Jorma Jokiniemi, tutkija Tiina Koljonen, ryhmäpäällikkö Veli Linna, tutkija Mikael Ohlström sekä erikoistutkija Heikki Oravainen, jotka ovat kommentoineet ja antaneet tietoja eri teknologioiden päästöistä ja rajoitusmahdollisuuksista tätä selvitystä varten.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	5
Alkusanat.....	6
Symboliluettelo.....	9
1. Johdanto.....	11
2. Työssä käsitellyt ilmansaasteongelmat ja niiden yhteys kasvihuonekaasujen päästöihin ja vähennystoimiin	13
2.1 Globaalit ilmansaasteongelmat.....	13
2.1.1 Happamoitumista ja otsoninmuodostusta aiheuttavat yhdisteet	13
2.1.2 Myrkylliset orgaaniset yhdisteet	15
2.1.3 Pienhiukkaset	16
2.1.4 Vaikutusketjut	16
2.2 Mekanismit ilmanlaadun parantamisen ja kasvihuonekaasujen vähentämisen välillä.....	17
3. Ilmansaasteita koskeva lainsäädäntö eri maissa	20
3.1 EU-maat.....	20
3.2 Muu Eurooppa.....	22
3.3 Kansallisia hiukkaspäästörajoja Euroopan maissa.....	22
3.4 Tulevaisuudennäkymät Euroopan päästölainsäädännölle	23
3.5 USA.....	24
3.6 Muu maailma.....	25
3.6.1 Aasia.....	25
3.6.2 Afrikka	26
3.6.3 Latinalainen Amerikka.....	26
4. Kansainvälisiä tutkimustuloksia	27
4.1 Ilmansaasteiden vaikutus kasvihuoneilmistöön ja sen rajoittamiseen	27
4.2 IPCC:n skenaariot.....	28
4.3 Kasvihuonekaasujen rajoittamisen sivuhyödyt ilmanlaatuun ja terveysvaikutuksiin.....	30
5. Skenaarioanalyysi Suomelle EFOM-ENV- energijärjestelmämallilla.....	33
5.1 Eri teknologioiden ilmansaasteiden päästöjen esittäminen EFOM-mallissa....	34
5.1.1 Rikin ja typen oksidien päästökertoimet.....	35

5.1.2	Hiukkasten päästökertoimet	38
5.2	Tarkastellut kokonaisskenaariot	40
6.	Tulokset.....	43
6.1	Rikkipäästöjen kehitys Suomessa.....	43
6.2	Typen oksidien päästöjen kehitys Suomessa.....	45
6.3	Hiukkaspäästöjen kehitys Suomessa	48
6.4	Tulosten epävarmuudet	53
6.4.1	Rikin ja typen oksidien päästöt	53
6.4.2	Hiukkaspäästöt	53
7.	Johtopäätökset.....	55
7.1	Globaalit sivuhyödyt	55
7.2	Skenaariotulokset Suomelle	56
7.3	Teknologioiden potentiaalit ja vaikutukset ilmansaasteisiin.....	58
7.4	Jatkotutkimustarpeet.....	60
8.	Yhteenveto	62
	Lähdeluettelo	64

Symboliluettelo

IPCC	hallitustenvälinen ilmastopaneeli
NO _x	typen oksidit (NO _x = NO + NO ₂)
PM _{2,5}	hiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 µm
PM ₁₀	hiukkaset, joiden halkaisija on alle 10 µm
SO ₂	rikkidioksidi
SO _x	rikin oksidit
TSP	kokonaishiukkaset (Total Suspended Particles)
UN/ECE	YK:n Euroopan talouskomissio
UN/FCCC	YK:n ilmastomuutoksen puitesopimus
VOC	haihtuvat hiilivedyt (Volatile Organic Compounds)
WHO	Maailman terveysjärjestö

1. Johdanto

Ilmastonmuutoksen hidastamista pidetään tällä hetkellä yhtenä ihmiskunnan suurimmista haasteista. Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kasvun tehokas rajoittaminen vaatii erittäin suuria rajoituksia kasvihuonekaasujen globaaleihin päästöihin. Esimerkiksi ilmakehän pitoisuuksien rajoittaminen kaksi kertaa esiteolliselle tasolle vaatisi noin 50–80 % päästövähennyksiä nykytasoon verrattuna tämän vuosisadan aikana (IPCC 2001).

Ilmastonmuutoksen hidastamiseen ja torjuntaan vaadittavat toimet edellyttävät erittäin suuria muutoksia energian tuotannon ja kulutuksen teknologioissa ja rakenteissa. Näillä toimilla voi olla myös hyvin merkittäviä suoria vaikutuksia muiden haitallisten aineiden päästöihin (esim. terveydelle haitalliset pienhiukkaset, raskasmetallit, pysyvät orgaaniset yhdisteet, happamoittavat, rehevöittävät ja otsonia muodostavat yhdisteet) ja siten laaja-alaisiin ympäristöongelmiin. Monissa tapauksissa Euroopan ja globaalissa mittakaavassa nämä muut ympäristötekijät ovat joko määräävä tai yksi merkittävä tekijä investoinneissa puhtaampaan teknologiaan. Mm. IPCC on kolmannessa arviointiraportissaan arvioinut ilmastonmuutoksen torjunnan sivuvaikutukset ja mahdolliset synergiahyödyt tärkeäksi lähivuosien tutkimustarpeeksi (IPCC 2001).

Viime vuosina on solmittu monia kansainvälisiä sopimuksia yllä mainittujen päästöjen rajoittamisesta. Paikalliset ja alueelliset ilmansaasteongelmat voivat varsinkin lyhyellä aikavälillä olla laukaiseva tekijä investoinnille esimerkiksi puhtaampaan energiantuotantoteknologiaan. Samoin päästörajoituslainsäädännön tiukentaminen muuttaa toimijoiden valintoja. Kansainväliset rajoitussopimukset, kansallisen lainsäädännön tiukentaminen ja ympäristöongelmien ratkaisupyrkimykset voivat myötävaikuttaa merkittävästi ilmastomyötäisen teknologian käyttöönotto- ja vientimahdollisuuksiin, mikäli ilmastomyötäiset teknologiat tarjoavat samalla ratkaisuja myös muihin ympäristöongelmiin. Tämä pätee myös kääntäen, eli ilmastomyötäisen teknologian käyttöönottoa voivat jarruttaa sen vaihtoehtoisia tekniikoita huonommat ominaisuudet muiden ympäristöpäästöjen suhteen.

Tämän hankkeen tavoitteena oli selvittää lyhyen ja keskipitkän aikavälin (noin vuoteen 2030 asti) keskeisimpien kasvihuonekaasujen vähennystoimien merkittävimpiä suoria sivuvaikutuksia muiden haitallisten aineiden päästöihin ilmaan ja niiden aiheuttamiin ympäristöongelmiin. Näkökulmina olivat suomalainen ja Euroopan laajuinen sekä soveltuvilta osin globaali, sillä monet ilmansaasteongelmat ovat merkittävässä määrin kaukokulkeutuvia ja jopa globaaleja ilmiöitä. Työn globaali osuus perustui kirjallisuuteen ja raportoituihin tutkimuksiin aiheesta.

Työn Suomea koskevassa osuudessa käytettiin hyväksi ja laajennettiin VTT Prosesseissa käytössä olevaa EFOM-energiajärjestelmämallia. Hankkeessa keskityttiin analysoimaan vain teknologisten vaihtoehtojen välittömät suorat sivuvaikutukset eri ilmansaasteiden päästöihin. Työssä laajennettiin EFOM-mallia kattamaan myös hiukkaspäästöjen laskenta kahdessa eri kokoluokassa. Lisäksi työssä päivitettiin jo olemassa olevat rikin ja typen oksidien laskentaa koskevat laskentarutiinit ja tietokannat vastaamaan uusinta tietämystä rajoitustekniikoiden ominaisuuksista. Samoin huomioitiin uusimmat lisäykset ja muutokset ilmansaasteiden päästöjä koskevassa lainsäädännössä. EFOM-mallilla tarkasteltiin vuoteen 2030 ulottuvia CLIMTECH-teknologiaohjelman skenaarioita ja sitä, miten muiden ilmansaasteiden päästöt muuttuvat kasvihuonekaasujen päästöjä rajoitettaessa.

Kasvihuonekaasujen vähentämisen sivuhyödyt energiantuotanto- ja teollisuussektoreilla pyrittiin tässä tutkimuksessa arvioimaan konservatiivisesti, eli työssä ei oletettu 'automaattisesti' tapahtuvaa ominaispäästöjen pienenemistä ajan mittaan teknologian ja käyttötaidon kehittyessä, vaan ainoastaan nykyisin tiedossa olevat tyypilliset päästötasot. On todennäköistä, että tulevaisuuden sivuhyödyt koskien energiantuotannon ja teollisuuden lähteitä ovat tämän tutkimuksen arvioita suuremmat. Hiukkaspäästöille tehtiin työssä lisäksi herkkyystarkastelu, jossa oletettiin päästökertoimien alenevan ajan mittaan tiedossa oleville kullakin teknologialla saavutettavalle tasolle keskimääräisen toteutuneen tason sijasta. Monet merkittävät hiukkaslähteet, kuten pienen mittakaavan poltto, tunnetaan vielä huonosti. Myös pienten hiukkaskokoluokkien päästöt eri polttoaineilla ja tekniikoilla tunnetaan vielä hyvin puutteellisesti. Suomen hiukkasten kokonaispäästöjen ja rajoitusmahdollisuuksien luotettavammaksi selvittämiseksi tarvittaisiin kattavampia mittauksia kuin mitä tätä työtä varten oli saatavilla. Näistä seikoista johtuu, että tuloksia hiukkaspäästöjen osalta on pidettävä luonteeltaan alustavina.

2. Työssä käsitellyt ilmansaasteongelmat ja niiden yhteys kasvihuonekaasujen päästöihin ja vähennystoimiin

2.1 Globaalit ilmansaasteongelmat

Ilmastonmuutoksen hidastamiseen ja torjuntaan vaadittavilla toimilla on usein merkittäviä suoria vaikutuksia muiden haitallisten aineiden päästöihin ja siten laajoihin ympäristöongelmiin. Laaja-alaisia globaaleja ilmansaasteongelmia ovat mm. terveydelle haitalliset pienhiukkaset, raskasmetallien ja pysyvien orgaanisten yhdisteiden kerääntyminen ekosysteemeihin ja ihmisiin, maaperän ja vesistöjen happamoituminen ja rehevöityminen laskeuman vaikutuksesta sekä korkeat maanpintatason otsonipitoisuudet, jotka ovat haitallisia sekä terveydelle että kasvillisuudelle.

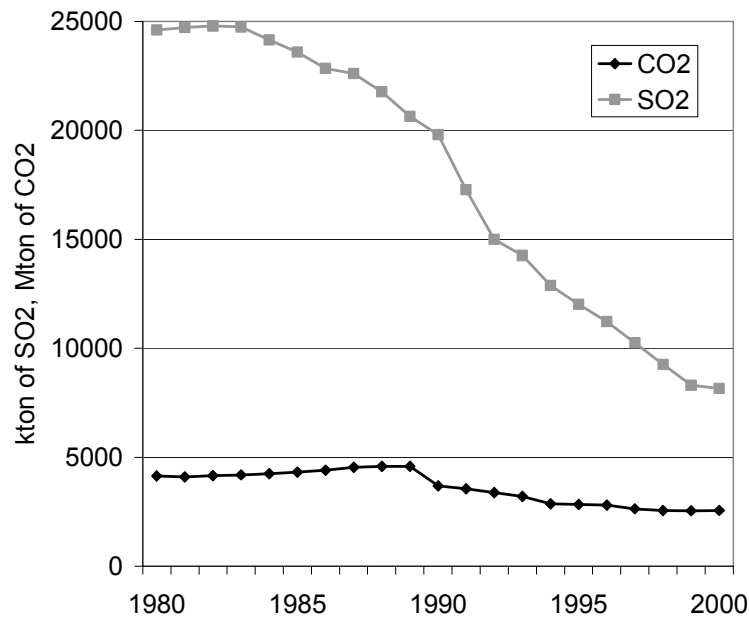
Monissa kehittyvissä maissa, jotka ovat suuria potentiaalisia ilmastomyötäisen teknologian markkina-alueita, ollaan vielä kehityksen alkupäässä ilmansaasteiden rajoittamisen suhteen. Tällaisia maita ovat esimerkiksi useimmat Aasian kehittyvät maat, kuten Kiina ja Intia. Kehittyvissä maissa ilmansaasteongelmat ovat usein hyvin vakavia alkeellisen teknologian ja suuren väestötiheyden vuoksi. Paikalliset maantieteelliset ja meteorologiset olot voivat lisäksi entisestään vaikeuttaa ilmansaasteongelmia. Suuret ilmansaasteiden pitoisuudet ovat erittäin merkittävä terveysriski. Esimerkiksi YK on arvioinut, että kehitysmaissa kuolee ennenaikaisesti lähes kolme miljoonaa ihmistä vuodessa ilmansaasteiden vuoksi (UNEP 2002b).

2.1.1 Happamoitumista ja otsoninmuodostusta aiheuttavat yhdisteet

Hengitysilman vaarallisen korkeat otsonipitoisuudet sekä metsiä ja vesistöjä vaurioitava ns. hapan sade ovat pitkään olleet vaikeita ongelmia Euroopassa ja osissa Pohjois-Amerikkaa. Kaikissa EU-maissa mitataan otsonipitoisuuksia, jotka ylittävät Maailman terveysjärjestön WHO:n suositukset. Vaikka otsoni ylhäällä stratosfäärissä on tarpeen suojaamaan meitä UV-säteilyltä, maanpintatasossa se on haitallista sekä ihmisille että kasveille. Keski- ja Etelä-Euroopan taajaan asutuilla alueilla maanpintatason otsonipitoisuudet nousevat haitallisiksi joka kesä noin 10–60 päivän ajan paikasta ja sääoloista riippuen. Pohjois-Euroopassa ongelma ei ole yhtä paha. Tämä johtuu pienemmästä päästötiheydestä ja meillä harvemmin esiintyvistä tyynistä hellejaksoista, joiden aikana otsonia muodostuu eniten. Hapan sade puolestaan on heikentänyt metsien kuntoa laajoilla alueilla Euroopassa ja aiheuttanut kalastovaurioita mm. Pohjoismaissa. Pahimpia vaurioita havaittiin 1970- ja 1980-luvuilla, jolloin Euroopan rikkipäästöt olivat huipussaan.

Happamoitumista aiheuttavat rikkipäästöt ovat peräisin etupäässä hiilen ja rikkipitoisen öljyn poltosta. Otonia muodostuu typen oksideista ja haihtuvista hiilivedyistä (ns. VOC-yhdisteet), joiden suurin päästölähde on liikenne. VOC-yhdisteitä pääsee ilmaan myös liuotinten ja öljytuotteiden käsittelystä. Typen oksidit aiheuttavat otsoninmuodostuksen lisäksi myös happamoitumista ja rehevöitymistä. Lähinnä maataloudesta peräisin olevat ammoniakkipäästöt voivat aiheuttaa maaperässä ja vesistöissä paitsi rehevöitymistä, myös happamoitumista. Kaikki nämä yhdisteet muodostavat myös hengitysilman haitallisia pienhiukkasia. Happamoitumista ja otsonin muodostusta aiheuttavat yhdisteet ovat kaukokulkeutuvia, eli ne voivat liikkua ilmassojen mukana jopa tuhansia kilometrejä.

Monissa tapauksissa Euroopan ja globaalissa mittakaavassa nämä muut ympäristötekijät ovat tällä hetkellä joko määräävä tai yksi merkittävä tekijä investoinneissa puhtaampaan teknologiaan. Euroopan entisissä sosialistisissa maissa 1990-luvun aikana tapahtuneet muutokset ovat eräs merkittävä esimerkki viime aikojen kehityksestä Euroopan alueella. 1970-luvulla ja 1980-luvulla Keski- ja Pohjois-Euroopassa havaittiin laaja-alaisia metsätuhoja ja kalastovaurioita, joiden pääsyyksi vahvistuivat suureksi osaksi entisistä sosialistisista valtioista peräisin olevat happamoittavat rikin ja typen päästöt. Ongelman ratkaisu vauhdittui 1990-luvun suurten poliittisten muutosten myötä. Teknisiä parannuksia tehtiin erityisesti entisessä Itä-Saksassa ja monissa nykyisissä EU:n hakijamaissa lähinnä rikkipäästöistä aiheutuvien ongelmien ratkaisemiseksi. Osaksi syynä olivat myös taloudelliset tarpeet uudistaa ja tehostaa käytössä olevaa tekniikkaa. Osassa entisiä sosialistisia maita syynä päästöjen laskuun on ollut myös taloudellinen lama ja polttoainepula. Kuvassa 1 on kuvattu rikkidioksidin ja hiilidioksidin päästöjen kehitys vuosina 1980–2000 entisissä Euroopan sosialistimaissa ja entisen Neuvostoliiton alueella. Rikin osalta entisen Neuvostoliiton päästöt on annettu Euroopan puoleiselle osalle.



Kuva 1. Rikin ja hiilidioksidin päästöjen kehitys 1980–2000 entisissä Euroopan sosialistimaissa ja entisen Neuvostoliiton alueella (IEA 2002a, Vestreng & Klein 2002).

2.1.2 Myrkylliset orgaaniset yhdisteet

Epätäydellinen palaminen synnyttää myös monia erittäin myrkyllisiä yhdisteitä, kuten dioksiineja ja furaaneja (Huotari & Vesterinen 1995). PCB-yhdisteitä syntyy erityisesti jätteenpoltossa. Nämä yhdisteet ovat erittäin pysyviä ja ne kulkeutuvat ilmakehässä kaikkialle maapallolla ja rikastuvat ravintoketjun huipulle. Dioksiinit, furaanit ja PCB-yhdisteet ovat YK:n 12 vaarallisimman pysyvän orgaanisen yhdisteen (Persistent Organic Pollutant, POP) listalla, ja niiden globaalia käyttöä ja leviämistä ympäristöön pyritään rajoittamaan YK:n ympäristöohjelman UNEP:n niin sanotun POP-sopimuksen kautta (UNEP 2002a). Vaarallisten orgaanisten yhdisteiden kerääntyminen ympäristöön ja eläimiin (mukaan lukien ihminen) on globaali ongelma. Myrkyllisten yhdisteiden on havaittu kertyvän voimakkaasti myös arktisille alueille (UNEP 2002b), jonne ne kulkeutuvat ilmakehän virtausten mukana päiväntasaajan alueilta asti.

Epätäydellisessä palamisessa syntyy myös polyaromaattisia hiilivetyjä eli PAH-yhdisteitä, joista monet ovat terveydelle haitallisia ja syöpää aiheuttavia (Huotari & Vesterinen 1995). PAH-yhdisteiden muodostuminen poltossa riippuu polttoaineen ominaisuuksista ja käytettävästä polttotekniikasta. PAH-yhdisteiden muodostuminen on erityisesti pienten tulisijojen ja kattiloiden ongelma. PAH-yhdisteiden muodostuminen on erityisen voimakasta myös kaasutustekniikoissa.

2.1.3 Pienhiukkaset

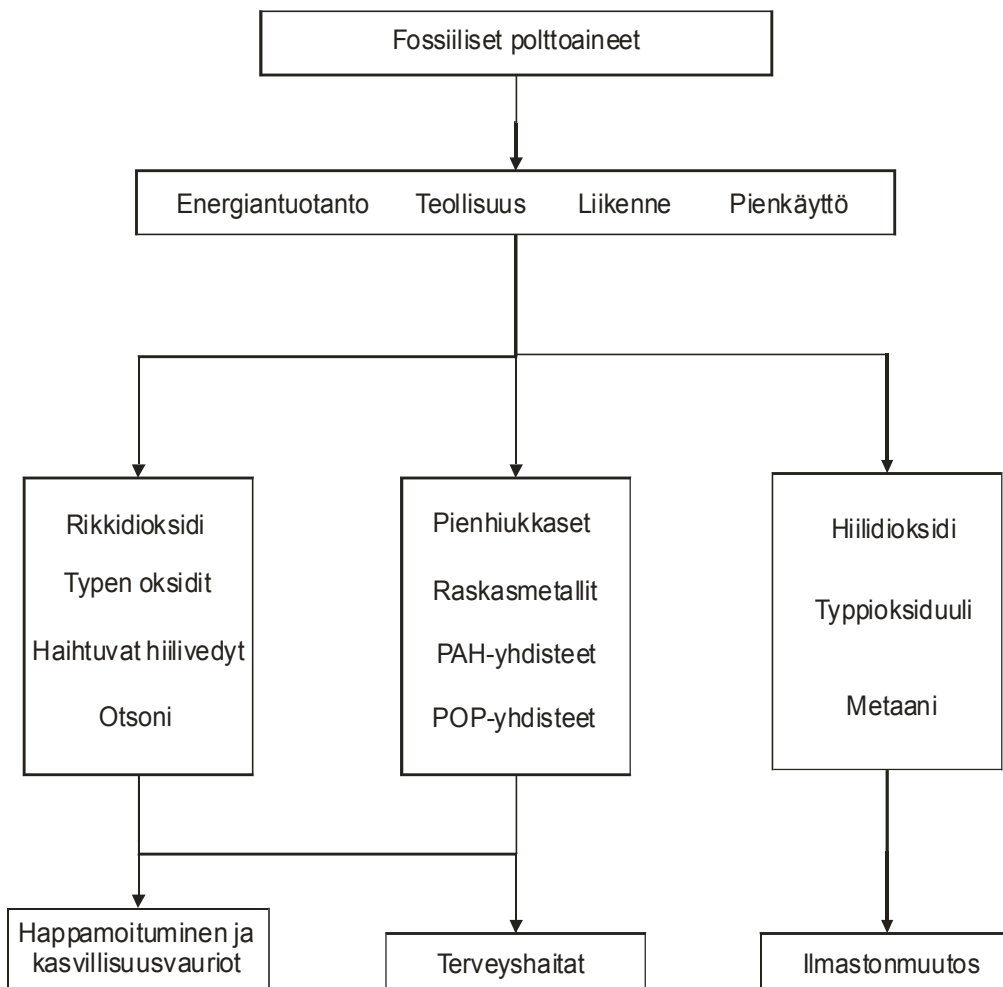
Ilmakehän pienhiukkasten haitallisista vaikutuksista väestön terveydelle on viime vuosina saatu uutta tutkimustietoa. Pienhiukkasten on osoitettu aiheuttavan merkittäviä terveyshaittoja. Maailman terveysjärjestö WHO on arvioinut, että korkeat hengitysilman hiukkaspitoisuudet aiheuttavat Euroopassa 100 000–400 000 kuolemantapausta vuositain (WHO 1999). Lisäksi muut vaikutukset kansanterveydelle, kuten hengityselinsairauksien lisääntyminen ja pahentuminen, ovat erittäin huomattavia.

Pienhiukkasia syntyy kaikissa polttoprosesseissa joko suoraan tai välillisesti (Jokiniemi & Kauppinen 1995). Savukaasujen epäpuhtauskomponentit, kuten rikin ja typen oksidit, muodostavat ilmakehässä tapahtuvan muutunnan kautta merkittäviä määriä ns. sekundaarisia pienhiukkasia, jotka ovat tyypillisesti kokoluokaltaan alle 2,5 µm. Lisäksi erityisesti kiinteän aineen, mutta myös öljyn poltossa, syntyy ns. primaarisia pienhiukkasia, joihin tässä työssä keskitytään.

2.1.4 Vaikutusketjut

Kuvassa 2 on esitetty fossiilisten polttoaineiden käytöstä syntyviä pääasiallisia ympäristöhaittoja ja niiden keskeisimpiä vaikutusketjuja.

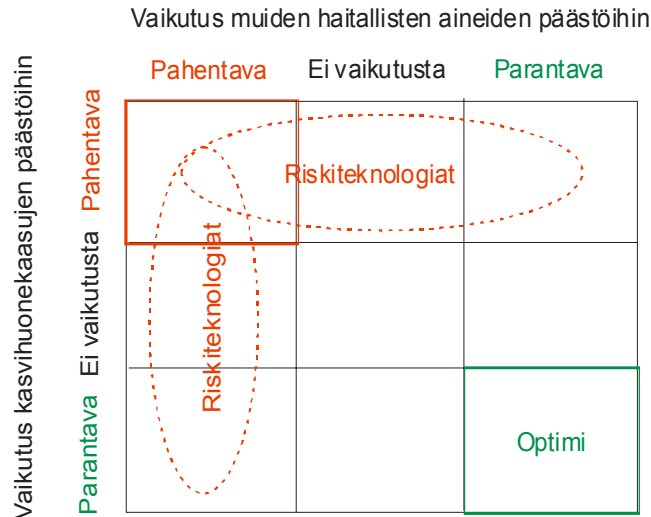
Kuvassa 2 on esitetty fossiilisten polttoaineiden pääasiallisimmat vaikutusketjut. Myös biomassapolttoaineilla on osittain samoja ominaisuuksia, kuten pienhiukkasten, typen oksidien ja haihtuvien hiilivetyjen merkittävä muodostuminen polttoprosesseissa. Monissa biomassapolttoaineissa on myös raskasmetalleja sekä pieniä määriä rikkiä. Lisäksi myös biopolttoaineiden poltossa voi syntyä hyvin merkittäviä määriä myrkyllisiä PAH- ja POP-yhdisteitä. Kaavioon merkittyjen pääasiallisten vaikutus-suhteiden lisäksi mm. pienhiukkaset ja rikin muodostamat sulfaattiaerosolit ovat merkittäviä alueellisesti kasvihuoneilmiöön vaikuttavia tekijöitä.



Kuva 2. Fossiilisten polttoaineiden käytön keskeisimmät suorat haitalliset vaikutusketjut.

2.2 Mekanismit ilmanlaadun parantamisen ja kasvihuonekaasujen vähentämisen välillä

Kasvihuonekaasujen vähentämistoimien on todettu vähentävän usein hyvin merkittävästi myös muiden ilmansaasteiden sivuvaikutuksia. Mahdollisuus ratkaista samalla ilmansaasteiden päästöjen aiheuttamia ongelmia voi vauhdittaa merkittävästi ilmasto-myötäisen teknologian kysyntää ja käyttöönottoa. Paikallisesta näkökulmasta elinympäristön puhdistuminen ja terveydelle vaarallisille aineille altistumisen väheneminen voi olla huomattavasti tärkeämpää kuin globaalien kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen. Kasvihuonekaasujen vähennystoimet voivat kuitenkin vaikuttaa paitsi vähentävästi, myös lisäävästi muihin ympäristöongelmiin. Kuvassa 3 on hahmoteltu mahdolliset vuorovaikutustavat kasvihuonekaasujen päästöjen vähennystoimien ja muiden haitallisten yhdisteiden päästöjen vähennystoimien välillä.



Kuva 3. Mahdolliset vuorovaikutussuhteet kasvihuonekaasujen päästöjen vähennystoimien ja muiden haitallisten yhdisteiden päästövähennystoimien välillä. Optimaaliset teknologiset ratkaisut vaikuttavat myönteisesti kaikkien haitallisten komponenttien päästöihin. Kuvaan on piirretty katkoviivalla alueet, joilla toimivia teknologioita voidaan pitää ei-toivottavina ratkaisuina.

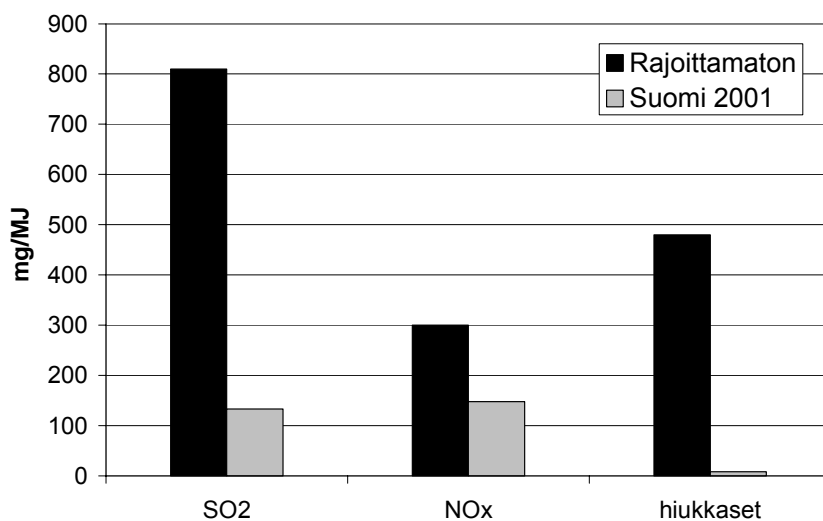
Kasvihuonekaasujen rajoitustoimilla on hyvin erilaisia sivuvaikutuksia. Energiantuotannon tehostamistoimet, joilla parannetaan systeemin hyötysuhdetta, ovat esimerkiksi teknologisista ratkaisuista, joilla vähennetään myös muita haitallisia vaikutuksia tuotettua energiayksikköä kohti. Samoin esimerkiksi teknologiset parannukset, joilla modernisoidaan vanha hiilikattila kaasukäyttöiseksi, tuottavat samalla sivuhyötyjä rikki-, typenoksidi-, raskasmetalli- ja pienhiukkaspäästöjen vähenemisessä.

Myös vaikutuksiltaan ristiriitaisia toimia ja teknologisia ratkaisuja on olemassa. Esimerkiksi puun pienpoltto nykyisillä tulisijatyypeillä ja huonoilla käyttötavoilla on Pohjoismaissa merkittävä pienhiukkasten, haihtuvien hiilivetyjen ja dioksiinin päästölähde. Puun pienpolton lisääminen fossiilisten polttoaineiden käytön korvaajana rakennusten lämmityksessä vähentää hiilidioksidipäästöjä, mutta voi lisätä tuntuvasti monien muiden haitallisten aineiden päästöjä, mikäli polttoteknologiaa ei paranneta ja käyttötapoihin kiinnitetä huomiota.

Toinen esimerkki ympäristövaikutuksiltaan kyseenalaisesta toimesta hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseen energian käytössä on usein ehdotettu bensiinimoottoria polttoainetaloudellisempien dieselmoottorien suosiminen henkilöliikenteessä. Nykyisin käytössä olevat dieselmoottoritekniikat tuottavat kuitenkin noin kymmenen kertaa enemmän terveydelle haitallisten pienhiukkasten päästöjä polttoaineyksikköä kohti kuin vastaavat bensiinimoottorit (Mäkelä 2002). Vertailua sekä diesel- ja bensiinimoottorien että eri polttoaineiden (esim. biokomponentit) hiukkaspäästöominaisuuksien välillä

kuitenkin vaikeuttaa se, että pienten hiukkaskokoluokkien osalta päästöominaisuudet voivat olla aivan erilaiset kuin kokonaismassan osalta (esim. Ikonen et al. 2000).

Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämistoimien vaikutus muiden ilmansaasteiden päästöjen vähenemiseen riippuu voimakkaasti teknologian tasosta, erityisesti siitä miten edistyneitä teknisiä vähennystoimia on jo käytössä. Kuvassa 4 on esitetty esimerkki tästä. Kaaviossa on kuvattu tyypilliset (hypoteettiset) kivihiilen rikki-, typenoksidi- ja hiukkaspäästökertoimet, mikäli mitään rajoitustekniikoita ei ole käytössä (Cofala & Syri 1998a,b, Ohlström 1998), sekä tällä hetkellä Suomessa kivihiilen käytölle energiantuotannossa toteutuneet keskimääräiset päästökertoimet (Energiatilastot 2002). Rajoittamaton rikkipäästö taso on kuvattu 1 % rikkiä sisältävälle hyvälaatuiselle kivihiilelle. Kuvattu hiukkaspäästöarvio kivihiilen poltolle ilman rajoitustekniikoita on raportoitu noin 20 MW laitoksilta (Ohlström 1998). Mikäli kasvihuonekaasujen rajoitustoimena sama energiamäärä tuotettaisiin vähemmän päästöjä aiheuttavalla energiamuodolla, olisivat suhteelliset sivuhyödyt sitä suuremmat, mitä korkeampi on lähtötilanteen päästö taso. Kaavion esittämä kuvitteellinen tilanne, jossa mitään päästö rajoitustekniikoita ei ole käytössä, pätee tällä hetkellä lähinnä kehitysmaissa. Teollisuusmaissa, joissa lainsäädäntö edellyttää haitallisten päästöjen rajoittamista, suhteelliset hyödyt ovat pienemmät.



Kuva 4. Tyypillisiä kivihiilen rikki-, typenoksidi- ja hiukkasominaispäästö tasoja hypoteettisessa vanhassa laitoksessa (rajoitustekniikoita ei ole käytössä), sekä tällä hetkellä Suomessa kivihiilen käytölle energiantuotannossa toteutuneet keskimääräiset ominaispäästö taset (Energiatilastot 2002).

3. Ilmansaasteita koskeva lainsäädäntö eri maissa

Ilmansaasteet tarkoittavat tässä kappaleessa ilman epäpuhtauksia, joilla on haitallisia vaikutuksia joko terveydelle tai luontoon. Termillä ilmansaaste ei tässä yhteydessä tarkoiteta hiilidioksidia, joka on kasvihuonekaasu, mutta joka ei sinällään ole pieninä pitoisuuksina myrkyllinen ihmisille eikä kasveille (kasvit tarvitsevat hiilidioksidia yhteyttämiseen).

3.1 EU-maat

Euroopan unioni on 1990-luvun loppupuolella ryhtynyt systemaattisiin toimiin ilmansaasteista johtuvien terveys- ja ympäristöhaittojen vähentämiseksi EU:n alueella. Unioni julkaisi vuonna 1997 ilmanlaatustrategian, jossa asetettiin pitkän aikavälin tavoitteeksi ettei terveydelle ja kasvillisuudelle haitallisia maanpintatason otsonipitoisuuksia ja happaman laskeuman tasoja enää esiinny EU:n alueella (Euroopan komissio 1997).

Ensimmäiset konkreettiset lainsäädäntötoimet tavoitteen saavuttamiseksi valmistuivat vuonna 2001, jolloin julkaistiin suurten polttolaitosten direktiivin (ns. LCP-direktiivi) uudistus ja kansallisten päästökattojen direktiivi (ns. NEC-direktiivi) (EU 2001a,b). Näiden avulla on määrä saavuttaa vuoteen 2010 mennessä välitavoitteet otsoni- ja happamoitumisongelmien suhteen. Suurten polttolaitosten direktiiviuudistus kiristi huomattavasti sekä jo olemassa olevien että tulevaisuudessa käyttöön otettavien yli 50 MW_e energiantuotantolaitosten rikin, typen oksidien ja hiukkasten päästörajoja. Suomelle direktiivi ei tuonut yhtä merkittäviä uusia velvoitteita verrattuna jo olemassa olevaan kansalliseen lainsäädäntöön kuin monille EU-maille, joissa ilmansuojelusäädökset ovat olleet löyhemmät.

Päästökattodirektiivi rajoittaa EU-maiden rikin, typen oksidien, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (ns. VOC-yhdisteet) ja ammoniakkin päästöjä. Direktiivissä on annettu kullekin yhdisteelle päästökattot, joita ei vuoden 2010 jälkeen saa ylittää. Direktiivin maakohtaiset päästörajat on laskettu ottaen huomioon otsoni- ja happamoitumisongelmien vakavuuden kunkin maan alueella sekä päästöjen rajoituskustannukset kussakin maassa. Edullisin tapa rajoittaa ongelmia laskettiin IIASA:n RAINS-optimointimallin avulla (Amann et al. 1999). Direktiivin vaatimusten tiukkuus kullekin maalle vaihtelee siten suuresti, riippuen etupäässä kunkin maan tähänastisen lainsäädännön tiukkuudesta. Oheisessa taulukossa on esitetty EU-maiden tämänhetkiset päästöt ja NEC-direktiivin päästökatto. NEC-direktiivi ei puutu sektorikohtaisiin päästöihin, vaan antaa maille vapaat kädet päättää ne keinot, joilla tavoitteisiin päästään.

Sektorikohtaiset säädökset, kuten liikenteen ns. Auto-Oil-ohjelman direktiivit (Euroopan komissio 2000), maatalouden karjasuoja-, lantala- ym. rajoitukset, liuotinpäästöjen rajoitukset jne, on kuitenkin täytettävä. Taulukossa 1 on esitetty EU:n päästökattodirektiivin rajoitusvaatimukset vuoteen 2010 mennessä verrattuna vuoden 1990 referenssitason.

*Taulukko 1. EU:n päästökattodirektiivin rikin ja typen oksidien rajoitusvaatimukset jäsenmaille vuoteen 2010 mennessä ja verrattuna vuosien 1990 ja 2000 päästöihin (*tieto vuodelle 1999) (EU 2001a, Tilastokeskus 2002, Vestreng & Klein 2002).*

	SO ₂			NO _x		
	1990	2000	2010	1990	2000	2010
Itävalta	91	41	39	202	184	103
Belgia	357	181*	99	321	289*	176
Tanska	181	28	55	277	207	127
Suomi	260	76	110	300*	208	170
Ranska	1341	659	375	1899	1432	810
Saksa	5321	831*	520	2706	1637*	1051
Kreikka	479	531*	523	311	340*	344
Irlanti	186	132	42	118	125	65
Italia	1651	923*	475	1938	1485*	990
Luxemburg	15	3	4	23	17	11
Alankomaat	202	91	50	574	421	260
Portugali	359	375*	160	317	369*	250
Espanja	2167	1535	746	1279	1419	847
Ruotsi	111	58	67	349	247	148
Iso-Britannia	3721	1165	585	2763	1512	1167
EU-15	16440	6630	3850	13380	9890	6519

Vuonna 2000 valmistui EU:n ns. jätteenpolttodirektiivi, jossa säädetään hiukkasten, rikin typen oksidien, myrkyllisten orgaanisten yhdisteiden ja raskasmetallien enimmäispäästörajat kaikille jätettä polttaville laitoksille (EU 2000). Direktiivi säätelee varsinkin tiukat raja-arvot jätteen poltolle. Hiukkasten osalta säädettiin 50 mg/Nm³ päästöraja alle 100 MW_{pa} laitoksille ja 30 mg/Nm³ päästöraja yli 100 MW_{pa} jätettä polttaville laitoksille. Nämä ovat saavutettavissa nykyisin olemassaolevilla rajoitustekniikoilla. Direktiivi kattaa jätteiden ja ongelmajätteiden polton ja yhteispolton muiden polttoaineiden kanssa sekä jätteiden pyrolyysin ja kaasutuksen silloin, kun tuotekaasu poltetaan välittömästi. Jotta raja-arvoihin päästään leijupetiteknikoilla, käytetään yleensä sähkösuodattimen (ESP) sijasta letkusuodattimia, joihin voidaan tarvittaessa myös injektoida kalkki-aktiivihiiliseosta.

3.2 Muu Eurooppa

Koko Euroopan haitallisten ilmansaasteiden päästöjä on jo 1980-luvun alusta lähtien säädelty YK:n Euroopan talouskomission alaisen Kaukokulkeutuvien ilmansaasteiden puitesopimuksessa, joka allekirjoitettiin v. 1979 alun perin torjumaan happamoittavien ilmansaasteiden aiheuttamia metsä- ja kalastovaurioita. 1980-luvulta lähtien sopimukseen on neuvoteltu lukuisia pöytäkirjoja, joissa on asetettu asteittain tiukkenevia rajoituksia rikin, typen yhdisteiden, VOC-yhdisteiden ja raskasmetallien päästöille. Sopimus kattaa lähes kaikki Euroopan maat mukaan lukien entisen Neuvostoliiton alueet. Vuonna 1999 allekirjoitettiin ns. Göteborgin pöytäkirja, joka asettaa aiempaa tiukemmat päästörajat rikille, typen oksideille, VOC-yhdisteille ja ammoniakille (UN/ECE 1999). Tämän raportin kirjoitushetkellä sopimus ei vielä ole tullut voimaan, mutta voimaantulo lähitulevaisuudessa on todennäköistä. EU-maille vaatimukset ovat jonkin verran EU:n NEC-direktiiviä löyhemmät.

EU:n odotettavissa oleva laajentuminen vaikuttaa voimakkaasti entisen Itä-Euroopan ilmansaasteiden päästöihin ja niiden tulevaisuudennäkymiin. EU on asettanut jäsenyyden ehdoksi mm. ympäristölainsäädännön ja -valvonnan saattamisen EU:n tasolle. Monissa hakijamaissa, kuten Tsekinmaassa, onkin jo toteutettu mm. noin 90 % vähennykset rikkipäästöissä verrattuna 1980-luvun huipputasoihin. Tämä kehitys näkyy Pohjoismaissakin kaukokulkeutuvien ilmansaasteiden pitoisuuksien ja laskeuman vähenemisenä. Vaikka Euroopan päästöjen voimakkaan rajoittamisen myötä erityisesti metsien ja vesistöjen happamoituminen ei enää ole laaja-alainen ilmiö Pohjoismaissa, kaukokulkeutuvat ilmansaasteet vaikuttavat merkittävästi Suomessakin koettaviin terveydelle haitallisten pienhiukkasten pitoisuustasoihin. Kaukokulkeuma on aiheuttanut esimerkiksi pääkaupunkiseudulla syksyllä 2001 ja keväällä 2002 merkittävät hiukkaspitoisuusepisodit, jotka johtuivat Virosta, Venäjältä ja Keski-Euroopasta kulkeutuneista saastuneista ilmanmassoista (Tervahattu et al 2001, <http://www.ytv.fi>). Episodien aikana hiukkasten (TSP, PM_{2,5}) pitoisuudet olivat noin viisinkertaiset vuosikeskiarvoihin verrattuna.

3.3 Kansallisia hiukkaspäästörajoja Euroopan maissa

Kansainvälisten sopimusten ja EU-direktiivien lisäksi Euroopan maissa on vaihtelevan tasoista kansallista päästölainsäädäntöä. Kiinnostavimpia suomalaisen teknologian vientimahdollisuuksien kannalta ovat kansalliset hiukkaspäästömääräykset erityisesti biomassaa polttaville pienen mittakaavan kattiloille ja tulisijoille. Suuremman mittakaavan kattiloiden kansalliset päästörajat eivät yleensä poikkea yhtä paljon EU-tason lainsäädännöstä. Hiukkaspäästöjen osalta kansainvälistä rajoituslainsäädäntöä ollaan vasta kehittämässä.

Hiukkaspäästöjen testausstandardeista ja päästörajoista Euroopan maissa on VTT:llä tehty katsaus vuonna 2000 (Oravainen 2000). Saksa, Itävalta ja Sveitsi ovat esimerkkejä Keski-Euroopan maista, jossa tiedostetaan pienhiukkasten terveyshaitat ja pienpolton tärkeä rooli hiukkasongelmassa. Taulukossa 2 on esitetty eri maiden hiukkaspäästöjen normistoa puupolttoainetta käyttäville pienen mittakaavan kattiloille. Lisäksi taulukossa on esitetty biopolttoaineiden osalta Euroopan standardointikomitean (CEN) vuonna 1998 hyväksymä standardi kiinteitä polttoaineita käyttäville kattiloille. EN-standardin päästörajat on määritetty kattilan energiatehokkuuden mukaan.

	Automaattinen	Manuaalinen
Saksa	150 mg/Nm ³	150 mg/Nm ³
Itävalta	60 mg/MJ	60 mg/MJ
Sveitsi	150 mg/Nm ³ (>70kW)	150 mg/Nm ³ (>70kW)
CEN-standardi 303-5	150-200 mg/Nm ³ *	150-200 mg/Nm ³ *

* Riippuen kattilan energiatehokkuudesta

Taulukko 2. Pienhiukkasten kansallisia päästörajoja pienen mittakaavan kattiloille eri Euroopan maissa, joissa pienen mittakaavan biomassan poltto on yleistä, sekä CEN:n standardi (Oravainen 2000).

3.4 Tulevaisuudennäkymät Euroopan päästölainsäädännölle

Tällä hetkellä sekä EU:n että YK:n kaukokulkeutumissopimuksen puitteissa ollaan viemässä eteenpäin pienhiukkasten pitoisuuksien rajoittamiseen tähtääviä toimia. EU:n CAFÉ-ohjelman (Clean Air For Europe) puitteissa tähdätään hiukkaspäästöjä ja -pitoisuuksia rajoittavan direktiiviehdotuksen saamiseen vuonna 2004. Ohjelma käyttää yhtenä työkaluna IIASA:n RAINS-mallia, jonka avulla voidaan laskea Euroopan maiden hiukkaspäästöjä ja niiden rajoitusmahdollisuuksia ja -kustannuksia (Lükewille et al. 2001). YK:n kaukokulkeutumissopimuksella on vastaavat suunnitelmat. Yhteistyössä EU:n kanssa se pyrkii saamaan vuoteen 2004 mennessä ehdotuksen sopimuksesta, jolla pienhiukkasten päästöjä rajoitettaisiin Euroopan alueella. Molemmissa suunnitelmissa otetaan huomioon sekä primaarihiukkaset että ilmakehän ns. sekundaarihiukkasia tuottavat rikin, typen oksidien, VOC-yhdisteiden ja ammoniakkin päästöt.

3.5 USA

USA:n lainsäädäntö on kaksitasoinen. Se koostuu sekä liittovaltiotason säädöksistä että osavaltioittain voimakkaasti vaihtelevista laeista ja määräyksistä. Liittovaltiotason lait määrittävät minimitasot, joita on noudatettava koko maassa. Tämän lisäksi osavaltiot voivat säätää tiukempia rajoituksia.

USA:ssa on vuonna 1990 annettu ns. Clean Air Act, joka säätää liittovaltiotasolla ilmansuojelua ja erityisesti määrittää kunkin ilmansaasteen sallittavan maksimipitoisuuden (<http://www.epa.gov>). Tämän lisäksi yksittäiset osavaltiot voivat säätää tiukempia määräyksiä. Laki sisältää myös lupakäytännön kaikille haitallisia ilmapäästöjä aiheuttaville toimijoille. Laissa kiinnitetään erityistä huomiota kaikkialla maassa yleisesti esiintyviin ilmansaasteisiin, joiden tiedetään aiheuttavan haitallisia terveysvaikutuksia. Näitä ovat maanpintatason otsoni ja sen muodostajat typen oksidit ja VOC:t, sekä pienhiukkaset, häkä, rikki ja lyijy.

Liittovaltion laissa on esimerkiksi rikin päästöille määritetty laitoskohtaiset päästökattot. Lisäksi laki antaa mahdollisuuden toimijoiden väliseen päästölupien kauppaan. Typen oksideille liittovaltion laki määrittää polttotapakohtaiset päästörajat ja vaatii low-NO_x-polttotekniikoiden käyttöä. Liittovaltion ilmansuojelulaki määrittää erikseen myös tyyppiohjeet ('guidelines') talokohtaisille puuta käyttäville tulisijoille. Ohjeilla pyritään ohjaamaan tulisijojen rakentamista mahdollisimman vähäpäästöiseen suuntaan erityisesti hiukkaspäästöjen osalta. Taulukossa 3 on esitetty US EPA:n päästömääräykset puuta käyttäville pientulisijoille.

Hiukkasten (PM₁₀) sallitut pitoisuusrajat ilmassa ylittyvät erityisesti Yhdysvaltojen länsiosissa. Läntisten osavaltioiden suunnitelmat pitoisuuksien saattamisesta sallittuihin rajoihin keskittyvät maasta nousevan pölyn, rakennustoiminnan pölypäästöjen, liikenteen, pienpolton ja teollisuuden päästöjen rajoittamiseen.

Yksittäisistä osavaltioista Kalifornia on jo pitkään ollut edelläkävijöitä ilmansuojelulainsäädännössä. Tämä johtuu osavaltion alueella olevista ilmanlaatuongelmista, kuten haitallisista otsonitasoista ja yleisemminkin ns. smogista, joita muodostuu erityisen tehokkaasti liikenteen päästöistä auringon vaikutuksesta. Vuoristojen ympäröimissä ns. kattilalaaksoissa ilman vaihtuminen on hidasta, mikä pahentaa ongelmaa. Esimerkiksi kotitalousmittakaavan poltto on Kaliforniassa osavaltion ilmansuojelulaissa voimakkaasti säädeltyä. Muiden kuin US EPA:n II vaiheen säädökset täyttävien tulisijojen myynti ja asentaminen on kielletty. Puupellettien polttoa määräykset eivät koske. Kaiken jätteen, kuten kotitalousjätteen, käsitellyn puun tai muovituotteiden poltto on kielletty. Samoin hiilen poltto on kielletty kotitaloustulisijoissa (<http://www.arb.ca.gov>).

Taulukko 3. US EPA:n puuta käyttävien lämmittävien tulisijojen hiukkaspäästö-standardit (US EPA 2002).

	Katalyyttiset tulisijat (g/tunti)	Muut tulisijat (g/tunti)
Phase I	5,5	8,5
Phase II	4,1	7,5

3.6 Muu maailma

Kehittyville maille Aasiassa, Latinalaisessa Amerikassa ja Afrikassa on ollut tyypillistä voimakas kaupungistuminen ja puutteellinen ja vahvistamaton ympäristölainsäädäntö. Lähes kaikki kehittyvien maiden suurkaupungit kärsivätkin pahoista ilmanlaatuongelmista (UNEP 2002b). Vaurastumisen myötä erityisesti Aasian suurkaupungeissa on ilmanlaatuongelmiin ja niiden aiheuttamiin vakaviin terveysriskeihin ryhdytty kiinnittämään aiempaa enemmän huomiota ja tehty parannustoimia. Miljoonien tai kymmenien miljoonien asukkaiden tiheään rakennetuissa ja autoistuneissa kaupungeissa haasteet ovat kuitenkin valtavat. Köyhemmissä kehitysmaissa tilanne on usein vielä huonompi.

3.6.1 Aasia

Aasian megakaupunkien ilmanlaatuongelmat ovat tällä hetkellä maailman vakavimpien joukossa. Maailman viidestätoista suurkaupungista, joissa tavataan korkeimmat hiukkaspitoisuudet, 12 sijaitsee Aasiassa (Aasian kehitys pankki 1999). Muun muassa Pekingissä, Shanghaissa, Jakartassa, Kalkutassa, Delhissä ja Teheranissa erityisesti pienhiukkasten, mutta myös rikin ja typen oksidien pitoisuudet ovat tasoilla, jotka aiheuttavat väestölle vakavia terveyshaittoja (UNEP 2002b). Tärkeimpiä ilmansaasteiden lähteitä ovat liikenne ja huonolaatuisten polttoaineiden (hiili, puu, kerosiini, lanta, jätteet) kotitalousmittakaavan poltto. Kehittyvien maiden teollistuneilla alueilla myös vanhanaikaiset teollisuuden ja energiantuotannon laitokset ovat merkittäviä ilmansaasteiden lähteitä.

Lainsäädäntö Aasian maissa vaihtelee suuresti. Esimerkiksi Japanissa on tehokas ilmansuojelulainsäädäntö. Tiukat päästö- ja teknologiastandardit sekä korkeat polttoaineiden hinnat ovat vähentäneet tuntuvasti muun muassa rikin, typen oksidien ja pienhiukkasten päästöjä. Myös monissa kehittyvissä maissa on otettu käyttöön päästönormeja teollisuudelle, energiantuotannolle ja liikenteelle. Esimerkiksi Aasian kokonaisrikkipäästöjen on kuitenkin arvioitu kasvaneen lähes 50 % vuosina 1985–1997 (Streets et al. 2000).

3.6.2 Afrikka

Afrikan maille on tyypillistä voimakas menossa oleva autoistuminen ja keho autokanta sekä vanhakantainen ja saastuttava teollisuus. Energiankäytöstä suuri osa kohdistuu ei-kaupallisiin polttoaineisiin. Keskeinen väestön ilmansaasteille altistumisen aiheuttaja on huonolaatuisten polttoaineiden (hiili, puu, kerosiini, lanta, jätteet) kotitalousmittakaavan poltto. Saharan eteläpuolisen Afrikan polttoaineiden käytöstä kahden kolmanneksen on arvioitu kohdistuvan perinteisiin polttoaineisiin (Maailmanpankki 2001). Myös ilmaansaasteita säätelevä lainsäädäntö on useimmissa Afrikan maissa hyvin puutteellista. Lähinnä Etelä-Afrikassa ympäristölainsäädäntö ja -valvonta on kehittyneiden teollisuusmaiden tasolla.

3.6.3 Latinalainen Amerikka

Myös Latinalaisessa Amerikassa vakavimmat ilmanlaatuongelmat liittyvät kaupunkien ilmanlaatuun sekä biomassan ja muiden kotitalouspolttoaineiden polton aiheuttamiin sisäilmaongelmiin. Etelä-Amerikassa liikenne on merkittävin kaupunkien ilman pilaaja. Esimerkiksi Buenos Airesin ja Mexico Cityn ilmansaasteiden päästöistä 70 % arvioidaan aiheutuvan liikenteestä (UNEP 2002b). Öljyntuottajamaissa myös öljynjalostuksen haitalliset päästöt ovat huomattavia.

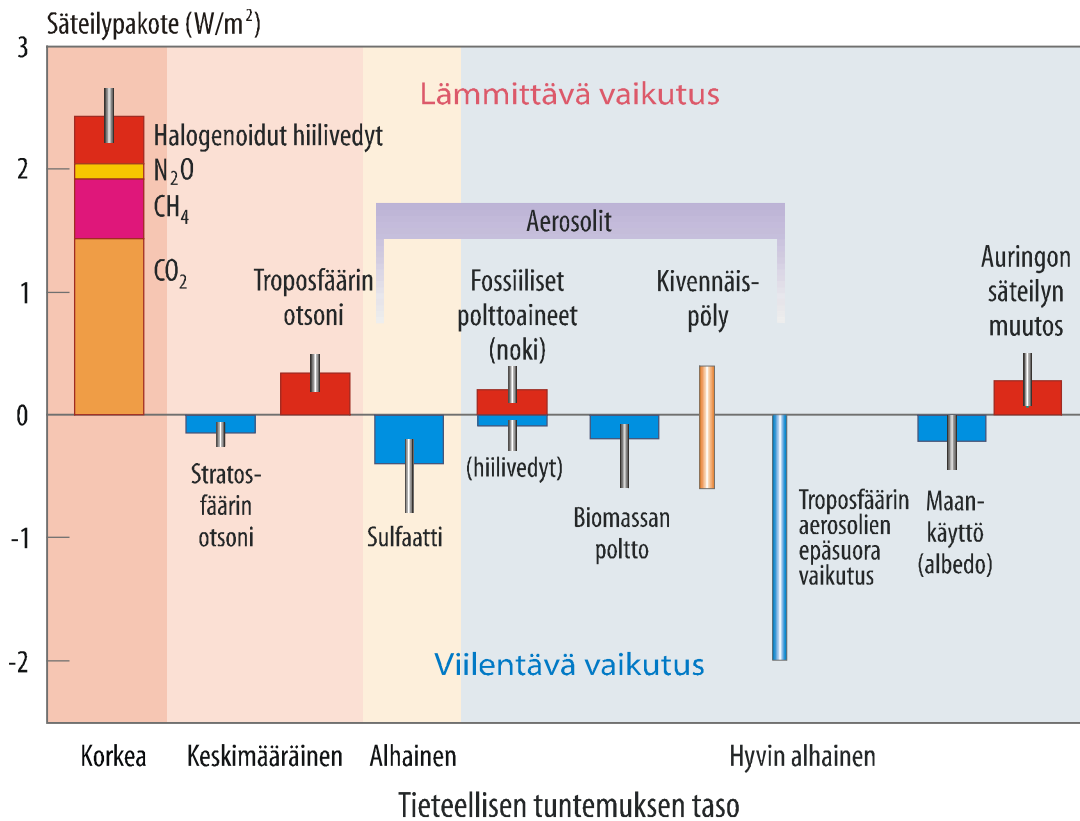
Ilmansaasteongelmien vähentämisyrittäykset Latinalaisessa Amerikassa ovat keskittyneet etupäässä kaupunkialueiden ilmanlaatustrategioihin. Toimet ovat kohdistuneet muun muassa kotitalouksien ja teollisuuden päästöjen rajoittamiseen, liikennekaluston testaus- ja huolto-ohjelmiin, kaluston uudistamiseen ja polttoaineiden laadun parantamiseen (UNEP 2002b).

4. Kansainvälisiä tutkimustuloksia

Ilmastonmuutoksen hidastamiseen ja torjuntaan vaadittavat toimet edellyttävät suuria muutoksia energian tuotannon ja kulutuksen teknologioissa ja rakenteissa. Näillä toimilla on myös merkittäviä suoria vaikutuksia muiden haitallisten aineiden päästöihin ja siten laajoihin ympäristöongelmiin (terveydelle haitalliset pienhiukkaset, raskasmetallit, pysyvät orgaaniset yhdisteet, happamoittavat, rehevöittävät ja otsonia muodostavat yhdisteet jne). Toisaalta myös paikalliset ilman epäpuhtaudet ovat kasvihuonekaasuja eli vaikuttavat alueelliseen säteilypakotteeseen. Tässä luvussa esitellään tarkemmin kansainvälisiä tutkimustuloksia näistä kysymyksistä.

4.1 Ilmansaasteiden vaikutus kasvihuoneilmiöön ja sen rajoittamiseen

IPCC:n kolmannessa arviointiraportissa on esitetty paikallisten ja alueellisten ilman epäpuhtauskomponenttien mahdollinen vaikutus maapallon säteilypakotteeseen suhteutettuna muiden kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutukseen (kuva 5). Useimpien aerosolien ja kaasujen vaikutus säteilypakotteeseen tunnetaan vielä tällä hetkellä varsin huonosti. Paikallisilla ilmansaasteilla (otsoni, pienhiukkaset, sulfaatit, noki jne.) on kuitenkin epäilemättä merkittäviä vaikutuksia alueelliseen säteilypakotteeseen. Paikalliset ilmansaasteet ovat hyvin lyhytikäisiä kasvihuonekaasuja, jotka poistuvat ilmakehästä tyypillisesti muutamassa viikossa. Nämä tekijät yhdessä voivat merkitä mm. sitä, että joidenkin paikallisten ilmansaasteiden entistä voimakkaampi rajoittaminen olisi tehokas ja kustannuksiltaan edullinen tapa hidastaa ilmastonmuutosta. Toisaalta laaja-alaiset ja tehokkaat ilmansuojelutoimet, jotka kohdistuvat ilmakehää alueellisesti viilentäviin komponentteihin (sulfaatit ja troposfäärin aerosolien epäsuora vaikutus), voivat kiihdyttää alueellista ilmastonmuutosta.



Kuva 5. Paikallisten ja alueellisten ilman epäpuhtauskomponenttien vaikutus maapallon säteilypakotteeseen suhteutettuna muiden kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutukseen tämänhetkisen tietämyksen perusteella (IPCC 2001).

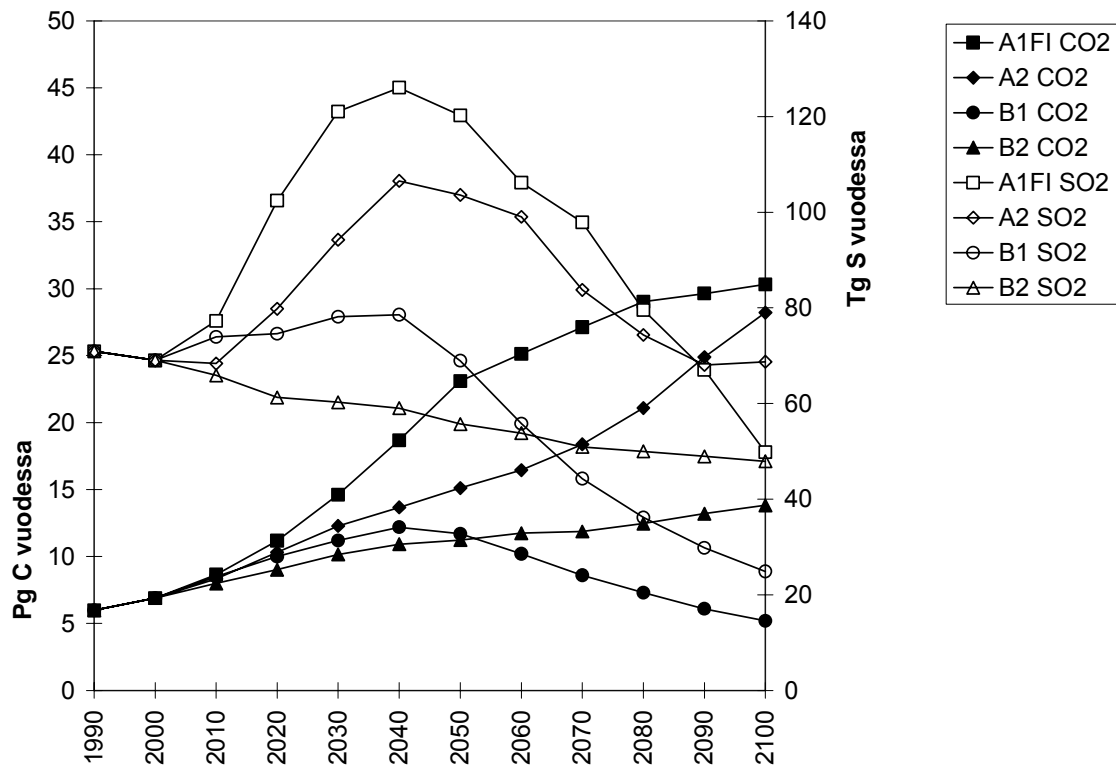
4.2 IPCC:n skenaariot

IPCC:n uusimmissa ns. SRES-skenaarioissa (Nakićenović 2000) kehitettiin erilaisia globaaleja tulevaisuusskenaarioita, jotka olivat hyvin erilaisia vaihtoehtoja globaaleihin päästöihin keskeisesti vaikuttaville taustatekijöille. Skenaariotyöhön osallistui kuusi mallinnusryhmää eri puolilta maailmaa. Skenaariot rakennettiin neljän erilaisen 'skenaarioperheen' ('Storyline families') ryhmiksi. Skenaarioissa oletettiin erilaisia taloudellisen kasvun, väestönkasvun, teknologisen kehityksen nopeuden, ym. vaihtoehtoja ja arvioitiin globaalien välittömien ja välillisten kasvihuonekaasujen päästöjen kehitystä vuoteen 2100 asti. Taulukossa 4 on esitetty IPCC:n neljän 'skenaarioperheen' keskeiset piirteet.

Taulukko 4. IPCC:n globaalien A1-, A2-, B1- ja B2-skenaarioiden keskeiset piirteet.

Skenaario	Väestönkasvu	Taloukasvu	Teknologinen kehitys	Ympäristöarvot
A1	hidas	hyvin nopea	nopea	keskitasoa
A2	nopea	vaihtelee alueittain	hidas	heikot
B1	hidas	nopea	nopea	vahvat
B2	keskitasoa	keskitasoa	keskitasoa	vahvat

Monet IPCC:n skenaarioissa käsitellyt välilliset kasvihuonekaasut ovat merkittäviä alueellisten ilmansaasteongelmien lähteitä, kuten rikkidioksidi, typen oksidit ja VOC-yhdisteet. Kuvassa 6 on esitetty IPCC:n A1FI-, A2-, B1- ja B2-skenaarioiden globaalien CO₂- ja SO₂-päästöjen kehitys vuoteen 2100 asti.



Kuva 6. IPCC:n A1FI-, A2-, B1- ja B2-skenaarioiden globaalien CO₂- ja SO₂-päästöjen kehitys vuoteen 2100 asti (Nakićenović 2000).

Kuvasta 6 nähdään, että IPCC:n skenaarioissa globaalien rikkipäästöjen kasvu seuraa hiilidioksidipäästöjen kasvua noin 2040-luvulle asti. Vasta sen jälkeen oletetaan tehokkaita SO₂-päästöjen rajoitustoimia. IPCC:n skenaarioissa typen oksidien päästöt ovat kutakuinkin verrannolliset hiilidioksidipäästöihin. IPCC:n skenaariot kattavat hyvin erilaisia kehityskulkuja sekä suorien kasvihuonekaasujen että rikin ja typen oksidien päästöille. Fossiilisten polttoaineiden käytön voimakkaaseen kasvuun perustuvissa skenaarioissa A1FI:ssa ja A2:ssa sekä hiilidioksidin että ilmansaasteiden, kuten rikin ja typen oksidien, päästöt kasvavat voimakkaasti. Rikkipäästöt taittuvat IPCC:n mukaan vuoden 2040 jälkeen. Vähemmän energia- ja fossiili-intensiivisissä skenaarioissa B1:ssä ja B2:ssa päästöjen kasvu on hillitympää, ja ilmansaasteiden päästöt kääntyvät laskuun viimeistään vuoden 2040 tienoilla. B1-skenaariossa myös globaalit hiilidioksidipäästöt kääntyvät laskuun vuoden 2040 jälkeen.

IPCC:n skenaarioissa ilmansaasteiden, kuten rikin ja typen oksidien, päästöt on kuitenkin arvioitu lähinnä jotta niiden välillinen vaikutus ilmastonmuutokseen pystyttäisiin huomioimaan kokonaisarvioissa. Tulokset on laskettu varsin karkealla alueellisella tasolla (maapallo on jaettu 13 alueeseen). Arviot eivät ole yksityiskohtaisten alueellisten analyysien tulosta, eikä niitä ole käytetty edelleen arvioimaan muutoksia ilmansaasteille altistumisessa. IPCC:n skenaarioissa esimerkiksi rikin ja typen oksidien teknisten rajoitustoimien vaikutus päästöihin tulevaisuudessa on arvioitu hyvin vaatimattomaksi, mikä ei ole todennäköinen kehityskulku monien kehittyneiden teollisuusmaiden kohdalla. Näiden syiden vuoksi tässä tutkimuksessa nähtiin tarpeelliseksi selvittää myös mitä tarkempia alueellisia analyysejä aiheesta on tehty. Nämä tulokset on esitetty seuraavassa luvussa.

4.3 Kasvihuonekaasujen rajoittamisen sivuhyödyt ilmanlaatuun ja terveysvaikutuksiin

Viime vuosina on raportoitu merkittäviä sivuhyötyjä alueellisten ilmansaasteongelmien vähenemisessä kasvihuonekaasupäästöjen rajoitustoimien myötä. Kansainvälisesti raportoituja tutkimuksia on tehty sekä yksittäisten kaupunkien ja maiden osalta että laajempia alueita koskien. Monissa tässä referoitavissa tutkimuksissa kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen aiheuttamat muutokset energiajärjestelmässä on arvioitu joko energiajärjestelmämallien tai yksityiskohtaisten alueellisten analyysien perusteella. Lisäksi analyyseihin on usein linkitetty ilmakehämallit muutoksista paikallisissa ja alueellisissa ilmansaasteiden pitoisuuksissa ja edelleen väestön altistumisessa kohonneille pitoisuuksille. Tutkimukset edustavat siten erilaista lähestymistapaa kuin IPCC:n 'Top-down'-skenaarioanalyysit. Suurimmat tutkimuksissa raportoidut odotettavissa olevia hyödyt ovat olleet peräisin pienhiukkaspäästöjen vähenemisestä ja siten terveyshaittojen pienenemisestä. Taulukkoon 5 on koottu tuloksia aiheesta.

Taulukko 5. Ilmastonmuutoksen torjuntatoimien arvioituja sivuhyötyjä eri maissa.

Tutkimuksen tekijä (ks. viiteluettelo)	Toimenpide	Sivuhyödyt ¹
Davis et al. 1997	Globaalit ilmastotoimet v.2020 asti (WEC, 1993) mukaan	n. 700 000 vuotuisen kuoleman välttäminen globaalisti
ECN-RIVM 2000	CO ₂ -päästöjen vähentäminen Hollannissa 30 % v. 1990–2030	SO ₂ - päästöjen väheneminen n. 30 %, NO _x -päästöjen väheneminen n. 25–35 %, VOC-päästöjen väheneminen n. 10 %, hiukkaspäästöjen väheneminen n. 15 %
Barker & Rosendahl 2000	Kioton pöytäkirjan toteuttaminen EU-15:ssa	SO ₂ - päästöjen väheneminen 12–14 %, NO _x -päästöjen väheneminen 7–8 %, PM10-päästöjen väheneminen 4 %
De Leo et al. 2001	Kioton pöytäkirjan toteuttaminen Italiassa	Ilmansaasteiden aiheuttamien haittojen pienenemisen arvo suurempi kuin vähennyskustannukset
Cifuentes et al. 2001	CO ₂ -vähennystoimet USA:ssa kohdistuen vanhoihin hiililaitoksiin	n. 18 000 ennenaikaisen kuoleman välttäminen jne.
Cifuentes et al. 2001	'Moderate GHG reductions in New York, Mexico City, São Paulo and Santiago by 2020'	n. 60 000 ennenaikaisen kuoleman, n. 6 miljoonan astmakohtauksen välttäminen jne.
Syri et al. 2001	Kioton pöytäkirjan toteuttaminen EU:ssa	SO ₂ -päästöjen väheneminen 12–22 %, NO _x -päästöjen väheneminen 8–12 %, VOC-päästöjen väheneminen 4 %
Alcamo et al. 2002	CO ₂ -pitoisuuksien stabilointiskenaarioilla (450 ja 550 ppm) saavutettavat säästöt SO ₂ - ja NO _x -rajoitustoimissa Euroopassa vuoteen 2100 asti	55–70 % alemmat rikkipäästöjen rajoituskustannukset, 40–55 % alemmat NO _x -päästöjen rajoituskustannukset (A1-550 ja B1-450 skenaariot)
IEA 2002b	Ilmastonmuutoksen torjuntatoimet OECD-maissa	Ilmansaastehaittojen pieneneminen kompensoi max. 30 % vähennyskustannuksista
Posch 2002	IPCC:n A1 ja B1-skenaarioiden ja CO ₂ -stabiloinnin vaikutukset maaperän happamoitumiseen ja rehevöitymiseen Euroopassa vuoteen 2100 asti	Stabilointiskenaariot (A1-550 ja B1-450) vähentäisivät erityisesti rehevöitymistä Euroopassa, lyhyellä aikavälillä myös happamoitumista
Syri et al. 2002	Kioton pöytäkirjan toteuttaminen Suomessa, tarkastelu vuoteen 2020 asti	Rikkipäästöjen väheneminen 28–32 %, NO _x -päästöjen väheneminen 10–12 %, hiukkaspäästöjen väheneminen 5–9 %

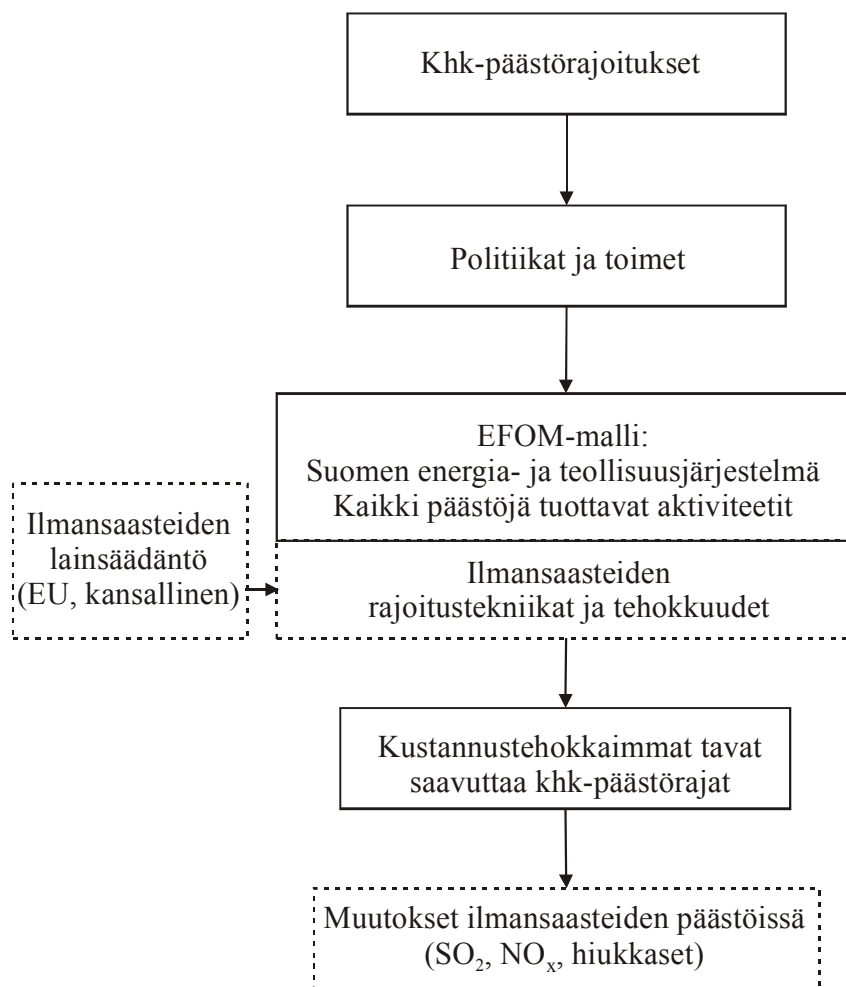
¹ Kaikki hyödyt on esitetty tutkimuksen kohdealueella ja verrattuna tilanteeseen samalla ajanjaksolla (esim. vuoteen 2010 mennessä) ilman ko. toimenpidettä.

Yleisin tutkimuksissa havaittu myönteisiä sivuvaikutuksia aiheuttava mekanismi oli vanhojen, tekniikaltaan huonojen hiilivoimalaitosten korvaaminen uudella tekniikalla ja puhtaammilla energialähteillä, mikä vähensi tuntuvasti pienhiukkasten päästöjä ja siten väestön altistumista ja haitallisia terveysvaikutuksia. Suurimmat sivuhyödyt tarkastelluissa tutkimuksissa saavutettiin maissa, joissa on käytössä runsaasti vanhaa hiilivoimalakapasiteettia ilman tehokasta savukaasunpuhdistusta. Näitä olivat globaalit ilmastotoimet tutkimuksessa (Davis et al. 1997) sekä vähennystoimet Mexico Cityssä, São Paulossa, Santiagossa ja New Yorkissa vuoteen 2020 asti (Cifuentes et al. 2001a,b), sekä CO₂-vähennystoimet USA:ssa, jotka kohdistuivat vanhoihin hiilivoimaloihin tutkimuksissa (Cifuentes et al. 2001a,b). Tarkastellut CO₂-vähennystoimet painottuivat erityisesti kehittyvissä maissa lähitulevaisuudessa kohtuullisin (tai jopa negatiivisin) kustannuksin toteutettavissa oleviin toimiin, kuten energiankäytön tehostamiseen ja polttoaineen vaihtoon energiantuotannossa, teollisuudessa, liikenteessä ja kotitalous- ja palvelusektorilla.

Maissa, joissa ympäristönsuojeluun ja savukaasujen puhdistukseen on jo investoitu paljon, tutkimuksissa havaitut sivuhyödyt olivat vaatimattomampia. Toisaalta ilman suojeluun jo merkittävästi investoineissa maissa teknisillä lisävähennyksillä olisi tyypillisesti varsin korkeat ominaiskustannukset. Kioton pöytäkirjan toteuttaminen EU:ssa alentaisi huomattavasti erityisesti rikin, mutta myös typen oksidien päästöjä tutkimusten (Barker & Rosendahl 2000, Syri et al. 2001) mukaan. (ECN-RIVM 2000) mukaan Hollannissa CO₂-päästöjen vähentäminen tuottaisi vähemmän sivuhyötyjä VOC- ja hiukkaspäästöjen vähenemisessä kuin rikin ja typen oksidien kohdalla. Tutkimuksessa tarkasteltu kaavailtu merkittävin CO₂-vähennyskeino, siirtyminen biopolttoaineisiin ja biomassan hyödyntämiseen, ei vähennä VOC- ja hiukkaspäästöjä ilman lisäinvestointeja puhdistusteknologiaan.

5. Skenaarioanalyysi Suomelle EFOM-ENV-energiajärjestelmämallilla

Tutkimuksen Suomea koskevassa osassa käytettiin VTT Prosesseissa käytössä olevaa EFOM-ENV-energiajärjestelmämallia arvioimaan, mitä muutoksia ilmansaasteiden päästöihin Suomen mittakaavassa on odotettavissa kasvihuonekaasujen vähentämistoimenpiteiden myötä. EFOM-mallia laajennettiin kattamaan myös hiukkaspäästöjen laskenta. Lisäksi päivitettiin jo olemassa olevat rikin ja typen oksidien laskentaa koskevat laskentarutiinit ja tietokannat vastaamaan uusinta tietämystä rajoitustekniikoiden ominaisuuksista sekä huomioitiin luvussa 3 esitellyt uusimmat lisäykset ja muutokset ilmansaasteiden päästöjä koskevassa lainsäädännössä. EFOM-mallilla tarkasteltiin vuoteen 2030 ulottuvia skenaarioita. Mallilla laskettiin erilaisia CLIMTECH-ohjelman määrittelemiä skenaarioita, joissa Suomen kasvihuonekaasujen päästöjä rajoitettiin mahdollisimman kokonaisedullisella tavalla. EFOM laski samalla tapahtuvat muutokset muiden ilmansaasteiden päästöissä. Kuvassa 7 on esitetty skenaarioanalyysin periaate. Tässä tutkimuksessa tehdyt laajennukset mallinnusjärjestelmään on merkitty katkoviivoituksella.



Kuva 7. EFOM-skenaarioanalyysin periaate. Tässä tutkimuksessa tehdyt laajennukset on merkitty katkoviivoituksella.

5.1 Eri teknologioiden ilmansaasteiden päästöjen esittäminen EFOM-mallissa

EFOM-mallissa on kuvattu järjestelmätasolla kaikki Suomen energian tuotantoon ja käyttöön liittyvät aktiviteetit (Lehtilä & Pirilä 1996, Lehtilä & Tuhkanen 1999). Lisäksi mallia on viime vuosina laajennettu kattamaan kaikki muutkin kasvihuonekaasujen päästöjä tuottavat aktiviteetit (Tuhkanen 2001, Oinonen & Soimakallio 2001). EFOM on energiajärjestelmän dynaaminen optimointimalli, joka laskee energian tarjontaa ja kysyntää erilaisilla käyttäjän määrittämällä ehdoilla ja rajoituksilla, kuten polttoaineiden hinnan kehityksellä tai kasvihuonekaasujen rajoitusvaatimuksilla. Mallin avulla voidaan määrittää kustannustehokkaimmat tavat saavuttaa halutut kokonaispäästörajoitukset.

EFOM-mallissa on esitetty noin 150 erilaista energiantuotannon teknologiaa ja kokoluokkaa. Osa mallin sisältämistä teknologioista on nykyisin Suomessa käytössä olevia. Lisäksi malli sisältää mahdollisia tulevaisuudessa käyttöön otettavia teknologisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi superkriittiset voimalaitokset ja erilaisia kaasutus- ja poltto-
kennoteknologioita.

Tässä tutkimuksessa arvioitiin kaikkien EFOM-mallissa olevien teknologioiden tyypilliset ilmansaasteiden (SO_x, NO_x, kokonaishiukkaset ja PM_{2,5}) päästökertoimet, jotka joko päivitettiin uusimman tiedon mukaisiksi tai lisättiin kokonaan uutena piirteenä mallin laskentaruutiineihin. Tämän laajennuksen avulla voitiin siten laskea Suomen ilmansaasteiden päästöt erilaisissa Suomen energiajärjestelmän tulevaisuuden skenaarioissa ja erilaisin kasvihuonekaasujen rajoitusvaatimuksin.

5.1.1 Rikin ja typen oksidien päästökertoimet

Rikin ja typen oksidien päästökertoimet polttoaineiden käytöstä kiinteissä lähteissä arvioitiin tämänhetkisen (sisältäen v. 2002 muutokset) lainsäädännön aiheuttamien rajoitustekniikkavaatimusten perusteella. Päästökertoimet esitettävät siis tyypillistä ko. polttoaineella, polttotekniikalla ja rajoitustekniikalla saavutettavaa keskimääräistä päästötasoa. Ehkä merkittävin yksittäinen muutos kiinteiden päästölähteiden nykyisissä ja odotettavissa olevissa päästöissä johtuu suurten polttolaitosten direktiivin uudistuksesta, joka tiukensi suurten laitosten päästörajoja EU:n alueella. Taulukossa 6 on esitetty suurten polttolaitosten direktiivin uudistuksen päästörajoja rikille ja typen oksideille, jotka ovat marraskuussa 2002 astuneet voimaan EU-maiden laitoksissa. Direktiivissä on annettu myös vuodesta 2016 eteenpäin tiukennetut raja-arvot typen oksidien päästöille olemassa oleville kiinteätä polttoainetta käyttäville laitoksille suurimmassa laitosluokassa. Direktiivi uudistus merkitsee Suomen laitosten päästötasoihin huomattavasti pienempää muutosta kuin monissa muissa EU-maissa jo ennestään tiukan kansallisen lainsäädäntömme vuoksi. Kaikki odotettavissa olevat muutokset otettiin mukaan EFOM-tietokantoihin.

Taulukko 6. Mallinnuksessa huomioituja suurten polttolaitosten direktiivin uudistuksen päästörajoja rikille ja typen oksideille (ilmoitettu SO₂:na ja NO₂:na) (EU 2001b).

Laitoskoko (MW _{th})	Toimilupa ennen 27.11.2002		Toimilupa jälkeen 27.11.2002	
	SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)
Kiinteät polttoaineet				
50–100	2000	600	850 / 200*	400
100–500	2000–400**	600	200	200 / 300* <300MW
yli 500	400	500 / 200****	200	200
Nestemäiset polttoaineet				
50–100	1700	450	850	400
100–300	1700	450	400–200**	200
300–500	1700–400**	450	200	200
yli 500	400	400	200	200
Maakaasu***				
50–100	35	300	35	150
100–300	35	300	35	150
300–500	35	300	35	100
yli 500	35	200	35	100

* biomassa

** lineaarinen muutos

*** muille kaasumaisille polttoaineille ja kaasuturbiineille on annettu erilliset rajat

**** vuodesta 2016 alkaen

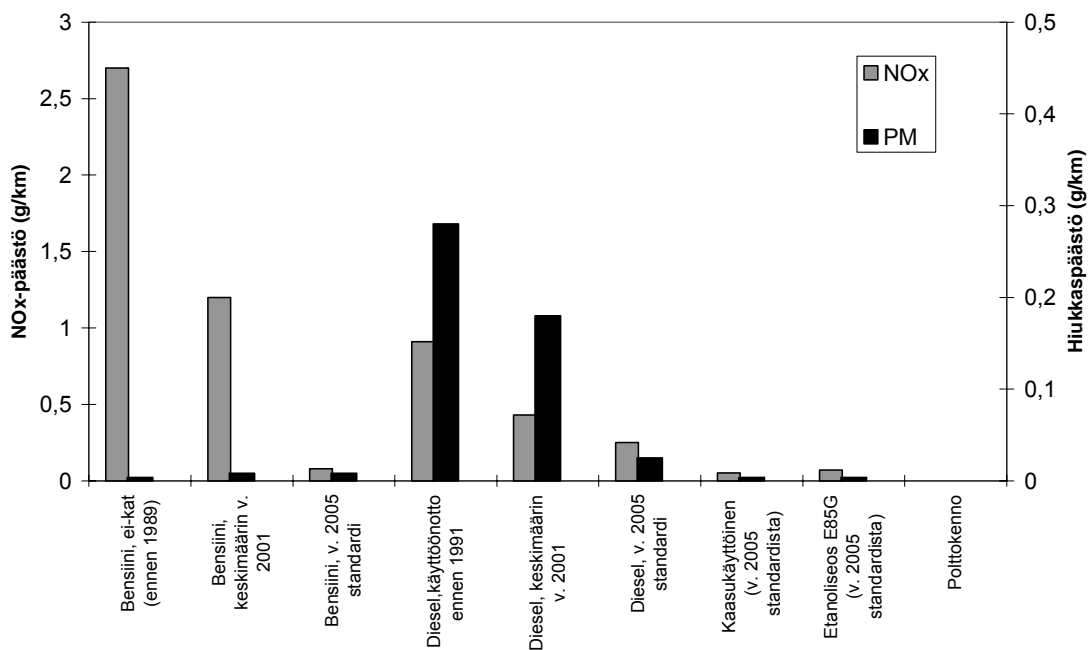
Prosessiteollisuuden päästökertoimien päivitys mallinnusta varten perustuu energia-tilastojen tietoihin (Tilastokeskus 2001, 2002) sekä yritysten omiin ympäristöraportteihin (mm. Outokumpu 2002, Rautaruukki 2002).

Liikennesektorilla käytetyt päästökertoimet perustuvat VTT:n LIPASTO-malliin (Mäkelä et al. 2002). Lisäksi EFOM-malliin sisällytettiin EU:n Auto-Oil II -ohjelman mukaiset liikenteen tulevaisuuden teknologioiden päästökertoimet. Liikennesektorilla huomioitiin nykyisten moottoritekniikoiden (EuroI – EuroIV -normit) lisäksi seuraavat pääasialliset uudet tieliikenteen teknologiat:

- hybridimoottorit henkilö- ja pakettiautoihin
- kaasukäyttöiset henkilöautot
- sähköautot jakelu- ym. käyttöön

- polttokennot henkilö- ja pakettiautoihin
- biodiesel pakettiautoihin
- biodiesel busseihin
- kaasukäyttöiset bussit
- biodiesel raskaassa kuljetuskalustossa.

Tämä ei ole kattava lista kaikista mahdollisista ja todennäköisistä tulevaisuuden teknologioista liikennesektorilla. EFOM-malliin pyrittiin liittämään tässä vaiheessa vain kokonaisvaikutukseltaan merkittävimmät uudet teknologiat lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä, jotta mallin käsittely ja laskenta-aika pysyisivät kohtuullisina. Näiden teknologioiden vaikutukset kasvihuonekaasujen, rikin, typen oksidien ja hiukkasten päästökertoimiin perustuvat (Euroopan komissio 2000, Ikonen et al. 2000) esitettyihin arvioihin. Kuvassa 8 on havainnollistettu henkilöautojen tyypillisiä NO_x - ja hiukkaspäästöjä erilaisilla moottori- ja vähennystekniikoilla ja polttoaineilla.



Kuva 8. Henkilöautojen tyypillisiä typen oksidien (NO_x) ja hiukkasten (PM) ominaispäästöjä erilaisilla nykyisillä ja tulevaisuuden moottoritekniikoilla ja polttoaineilla (Mäkelä et al. 2002, Euroopan komissio 2000, EU 1998).

5.1.2 Hiukkasten päästökertoimet

Tässä työssä kehitettiin mallilaskentaa sekä kokonaishiukkaspäästöille (TSP) että 2,5 mikrometriä pienemmille hiukkasille (PM_{2,5}). Kokonaishiukkaspäästöistä ja niiden päästökertoimista oli saatavilla huomattavasti enemmän tietoa kuin PM_{2,5}:stä. Tämän johdosta työssä päädyttiin esittämään PM_{2,5}-päästökertoimet polttoaineesta, poltto-tekniikasta ja rajoitustekniikasta riippuvina osuuksina kokonaishiukkasten päästökertoimista. Työssä käytetyt PM_{2,5}:n osuudet kokonaishiukkaspäästöstä perustuvat kirjallisuuslähteisiin (Lükewille et al. 2001, Jokiniemi 2002, Ohlström 1998, Norbeck et al. 1998, Martin et al. 2000).

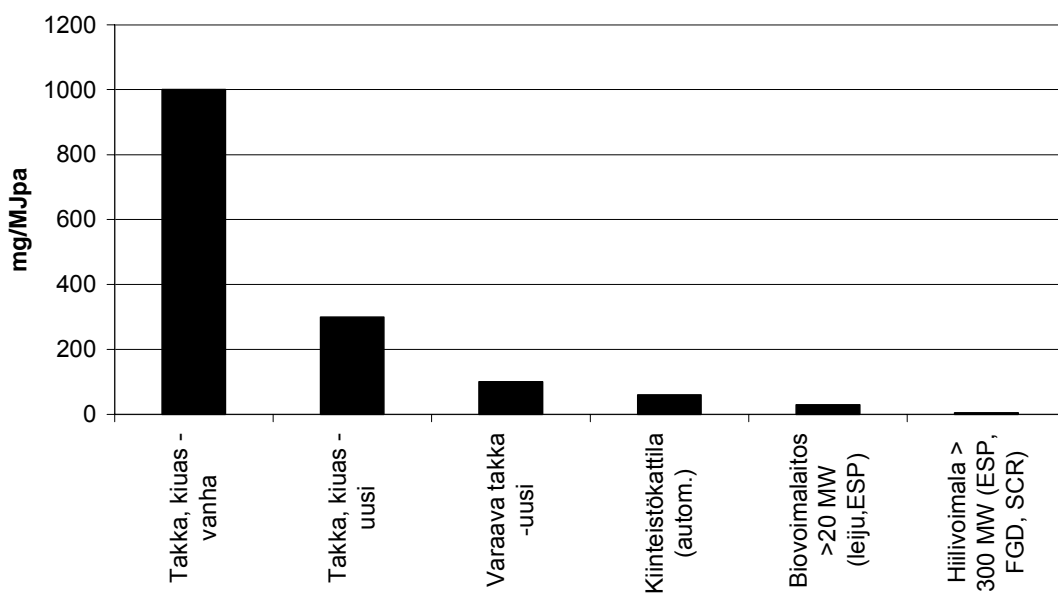
Energiasektorin pienhiukkasten päästökertoimet perustuvat VTT:llä tehtyihin tutkimuksiin (mm. Ohlström 1998, Jokiniemi 2002) sekä muuhun saatavilla olevaan kirjallisuuteen (mm. Norbeck et al. 1998, Martin et al. 2000, Karvosenoja 2001, Lükewille et al. 2001). Prosessiteollisuuden päästökertoimien arviointi mallinnusta varten perustui energiatilastojen tietoihin (Tilastokeskus 2001, 2002) sekä yritysten omiin ympäristöraportteihin (mm. Outokumpu 2002, Rautaruukki 2002).

Pienen mittakaavan poltto (kiinteistöjen tulisijat, lämmityskattilat jne.) on erittäin merkittävä hiukkaspäästöjen tuottajasektori. Sen vuoksi tutkimuksessa kiinnitettiin huomiota pienen mittakaavan päästölähteiden mallinnukseen erillään muusta energiantuotannosta ja lähteiden mahdollisimman realistiseen esittämiseen. Pienlähteiden päästöjen mallinnus sisältää kuitenkin väistämättä erittäin suuria epävarmuuksia, sillä sektorin päästölähteet ovat hyvin heterogeenisiä ja käytötavalla on erittäin suuri vaikutus todellisiin päästöihin. Lisäksi pienlähteistä on toistaiseksi ollut julkisesti saatavilla hyvin vähän mittaustuloksia, jotka edustaisivat kattavasti erilaisia tulisijatyyppejä ja käyttötilanteita. Tässä tutkimuksessa jaettiin pienen mittakaavan poltto taulukossa 7 esitetyn jaottelun mukaisiin luokkiin. Lisäksi työssä eriteltiin keskimääräiset olemassaolevat laitetypit ja arvioidut uusien laitteiden keskimääräiset päästötasot. Päästökertoimet on arvioitu etupäässä viimeaikaisten tutkimusten (Karvosenoja 2001, Lükewille et al. 2001, Nussbaumer 2001) perusteella. Arviot ovat hyvin karkeita, mikä johtuu kattavan tiedon puutteesta, ja niitä on käsiteltävä alustavina. Tässä työssä käytetyt saunojen päästökertoimet olivat jonkin verran korkeammat kuin Kuopion yliopiston hiljattain tekemät mittaukset, joissa TSP-ominaispäästöt vaihtelivat välillä 52–271 mg/MJ_{pa} (Hytönen et al. 2002). Kaikista pienpolton lähteistä tarvittaisiin kattavampaa mitattua päästötietoa keskimääräisen päästötason paremmaksi arvioinniksi.

Taulukko 7. EFOM-malliin liitetyt pienen mittakaavan polttotekniikat ja niiden hiukkaspäästökertoimet (TSP).

Päästökerroin	Vanha laite (mg/MJ _{pa})	Uusi laite (mg/MJ _{pa})
vapaa-ajan käyttö (saunat, takat, uunit)	1000	300
lämmitys:		
uunit	1000	200
takat (lähinnä varaavat)	300	100
puukattila (yläpalo- / alapalo-tyyppi)	300	100
puukattila (käänteispalo / stoker)	80	60

Kuvassa 9 on suhteutettu pienen mittakaavan polton päästöjen merkitys tuotettua energiayksikköä kohti verrattuna suuriin energiantuotantolaitoksiin. Kuvassa esitetyt laitosten päästöominaisuudet ovat yksinkertaistettuja verrattuna esitystapaan EFOM-mallissa, jossa eri kokoluokat ja vaadittavat tyypilliset rajoitustekniikat on esitetty yksityiskohtaisemmin.



Kuva 9. Tyypillisten hiukkaspäästökertoimien suuruusluokat pienlähteissä ja erilaisissa energiantuotantolaitoksissa. Päästökertoimet ovat pienlähteiden osalta karkeita arvioita ja riippuvat olennaisesti tulisiijan käyttötavasta.

Liikennesektorin hiukkaspäästöjen laskennan sisällyttäminen EFOM-malliin tehtiin analogisesti rikin ja typen oksidien päästölaskennan kanssa. Eroja eri moottoritekniikoiden ja kiristyvien standardien vaikutuksissa ominaispäästöihin on havainnollistettu kuvassa 8 edellisessä luvussa. Käytetyt päästökertoimet perustuvat VTT:n LIPASTO-malliin (Mäkelä et al. 2002). Lisäksi EFOM-malliin sisällytettiin EU:n Auto-Oil II -ohjelman mukaiset liikenteen tulevaisuuden teknologioiden ja polttoaineiden päästökertoimet tai keskimääräiset arvioidut päästötasot verrattuna vastaavaan konventionaalisiin polttoaineita käyttävään moottoriin (Euroopan komissio 1998, 2000, Ikonen et al. 2000).

5.2 Tarkastellut kokonaisskenaariot

Tässä selvityksessä tarkastellut skenaariot ovat CLIMTECH-tekniologiaohjelman skenaarioita Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen teknologisista rajoitusmahdollisuuksista vuoteen 2030 asti ulottuvalla aikajänteellä. CLIMTECH-ohjelman tavoitteena oli edistää ilmastonmuutoksen hillintää sekä kansallisten ja kansainvälisten päästörajoitustavoitteiden saavuttamista tukemalla ilmastonmuutosta rajoittavan teknologian valintoja, tutkimusta, kehitystä, kaupallistamista ja käyttöönottoa. Ohjelman puitteissa tehdyt kokonaisskenaariotarkastelut laadittiin tukemaan näitä tavoitteita. Sen vuoksi skenaariotarkasteluissa pyrittiin arvioimaan, mikä teknologian kehittämisen ja käyttöönoton edistämisen rooli voisi olla päästörajoitustavoitteiden saavuttamisessa ja kokonaisvähennyskustannusten alentamisessa. Tämä toteutettiin tarkastelemalla kahta vaihtoehtoista globaalia tulevaisuudenkuvaa:

- 'Tavanomainen teknologinen kehitys'

Ilmastonmuutoksen kansainväliset hillintätoimet etenevät melko hitaasti. Kasvihuonekaasujen päästöjä vähentävän teknologian kehittämiseen ei maailmassa panosteta merkittävästi nykyistä enempää, ja puhtaampien teknologioiden käyttöönotto myös Suomessa etenee melko hitaasti. Suomalaisten teknologioiden vientimahdollisuudet eivät juuri parane nykyiseen verrattuna, ja puhtaan teknologian vientimarkkinat kasvavat hillitysti.

- 'Optimistinen teknologinen kehitys'

Kansainväliset ilmastonmuutoksen hillintätoimet vauhdittuvat. Kasvihuonekaasujen päästöjä vähentävän teknologian kehittäminen nähdään tärkeäksi kaikkialla ja siihen panostetaan entistä enemmän. Teknologioiden ominaisuudet ja kilpailukyky suhteessa päästöjä aiheuttaviin teknologioihin kehittyvät nopeasti. Suomessa otetaan lisääntyvässä määrin käyttöön puhtaampaa teknologiaa, ja kotimarkkinoilla

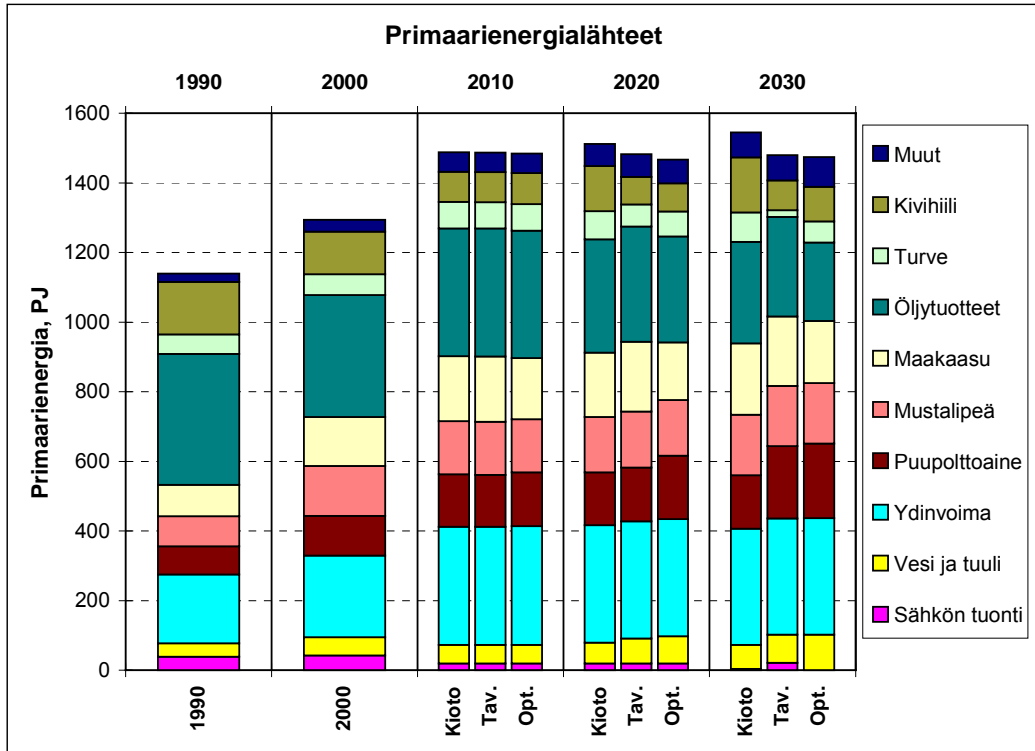
lisääntyvä kysyntä vauhdittaa osaltaan kotimaisten teknologisten ratkaisujen kehitystä. Myös teknologioiden vientimahdollisuudet ja kansainvälinen kysyntä kehittyvät nopeasti. Suomi kehittyy globaalisti merkittäväksi puhtaan teknologian toimittajaksi.

Näillä vaihtoehtoisilla tulevaisuudenkuvilla tarkasteltiin erilaisia rajoitustavoitteita Suomen kasvihuonekaasujen päästöille (Lehtilä & Syri 2003). Tarkastellut vähennys-skenaariot vuoteen 2030 asti olivat:

- -10 % vuoden 1990 päästöistä, ei päästökauppaa
- -20 % vuoden 1990 päästöistä, ei päästökauppaa
- -30 % vuoden 1990 päästöistä, ei päästökauppaa
- -20 % vuoden 1990 päästöistä, hiilidioksidin päästökauppa sallittu EU:n direktiivi-ehdotuksen mukaisesti

Kaikki nämä rajoitusskenaariot laskettiin Suomen kokonaiskasvihuonekaasupäästöille eli huomioiden kaikki Kioton pöytäkirjan kuusi kasvihuonekaasua (CO₂, N₂O, CH₄, HFC:t, PCF:t, SF₆) ja kaikki päästöjä tuottavat sektorit. Päästörajoitustoimien jakautuminen eri sektorien ja kaasujen välille määräytyi toimien kustannustehokkuuden mukaan.

Kuvassa 10 on esitetty EFOM-mallilla laskettu primaarienergian kulutus 'Tavanomainen'- ja 'Optimistinen'-skenaarioissa tilanteessa, jossa Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjä on rajoitettava -20 % vuoden 1990 tilanteesta vuoteen 2030 mennessä.



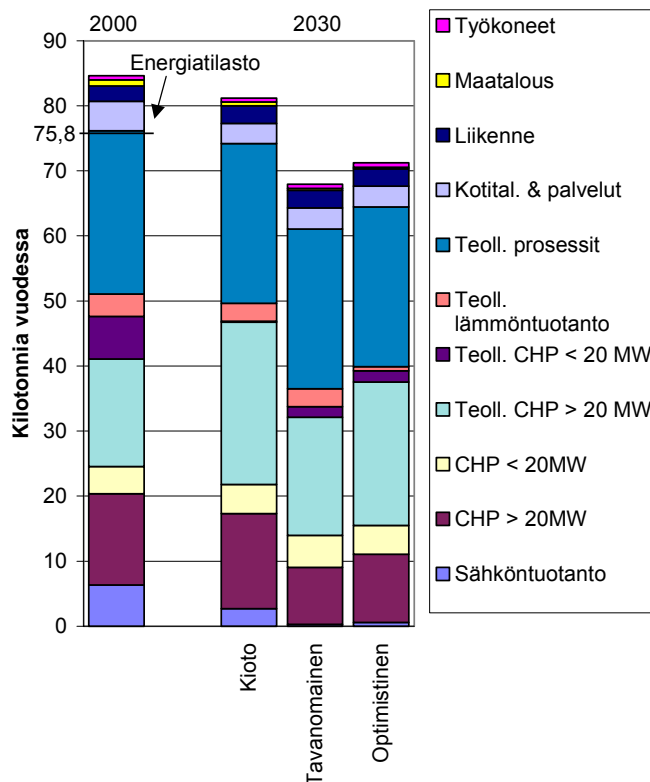
Kuva 10. Primaarienergian kulutus energialähteittäin Suomessa -20 % kasvihuonekaasuvähennysskenaariossa (Lehtilä & Syri 2003).

6. Tulokset

6.1 Rikkipäästöjen kehitys Suomessa

Suomen rikkipäästöjä on alennettu 1980-luvun alusta lähtien voimakkain toimenpitein. Tämän seurauksena Suomen rikkipäästöt ovat pudonneet 1980-luvun alun huipputasosta yli 85 prosentilla, lähes 600 kilotonnista rikkidioksidia tasolle 75–85 kilotonnia rikkidioksidia vuodessa. Vuotuiset rikkipäästöt ovat viime vuosina vaihdelleet riippuen lähinnä siitä, paljonko vesivoimaa on saatavilla, mikä on huippukauden sähköntarve ja paljonko hiililauhdevoimaa tuotetaan.

Suomen rikkipäästöjen tulevaisuuden kehitys arvioitiin Climtech-ohjelman skenaarioissa vuoteen 2030 asti olettaen, että päästörajoitukset ja rajoitustekniikat säilyvät nykyisellä tasolla. Kuvassa 11 on esitetty Suomen rikkipäästöjen kehitys v. 2000–2030 EFOM-mallilla laskettuna tarkastelluissa Climtech-skenaarioissa (-20 % kasvihuonekaasujen vähennystavoitteella).

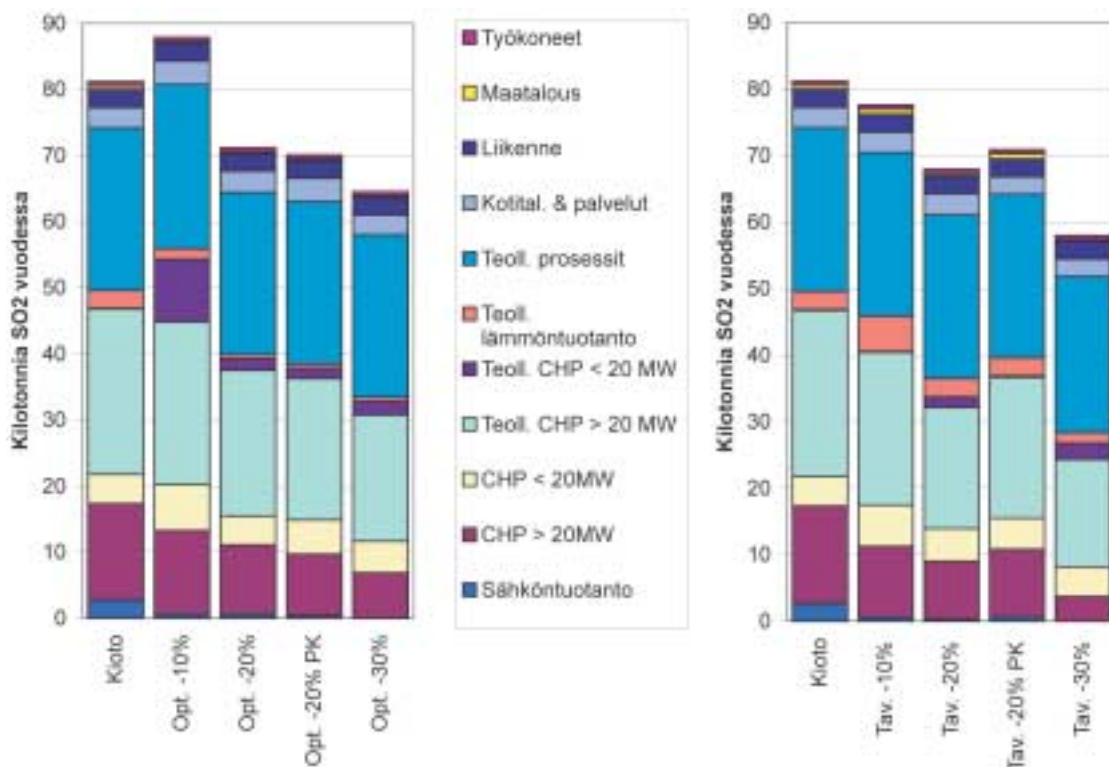


Kuva 11. Suomen rikkidioksidipäästöjen kehitys vuodesta 2000 vuoteen 2030 tarkastelluissa Climtech-skenaarioissa -20 % kasvihuonekaasujen vähennystavoitteella ja verrattuna 'Kioto'-skenaarioon.

Mallinnetut vuoden 2000 päästöt ovat suuremmat kuin vuoden 2000 tilastotieto (Tilastokeskus 2002). Tämä johtuu etupäässä siitä, että vuonna 2000 oli saatavilla runsaasti vesivoimaa ja talvi oli epätavallisen lämmin. Tämän johdosta vuonna 2000 tuotettiin poikkeuksellisen vähän hiililauhdevoimaa, jolloin rikkipäästöt jäivät alhaisiksi. EFOM-malli ei kuvaa yksittäisen vuoden meteorologisista oloista johtuvia ääritilanteita, vaan keskimääräistä tilannetta.

Kuvasta 11 nähdään, että Kioton pöytäkirjaa tiukempi kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen (tässä -20 %) vähentäisi rikkipäästöjä 11–16 %. Vähennys tapahtuu etupäässä erillisessä sähköntuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, ja pääsyyinä on hiilen ja turpeen käytön väheneminen.

Kuvassa 12 on esitetty rikkipäästöt vuonna 2030 kaikissa tarkastelluissa kasvihuonekaasujen vähennyskenaarioissa.



Kuva 12. Rikkipäästöt vuonna 2030 tarkastelluissa eri kasvihuonekaasujen vähennyskenaarioissa optimistisen ja tavanomaisen kehityksen tapauksessa. Päästökauppa-skenaariossa (-20 % PK) optimistisen teknologiakehityksen tapauksessa Suomi myy CO₂-päästöoikeuksia ja tavanomaisessa päästöoikeuksia ostetaan. Vähennysprosentit viittaavat kasvihuonekaasujen vähennystavoitteeseen vuonna 2030.

Kuvasta 12 voidaan nähdä, että rikkipäästöt enimmäkseen seuraavat kasvihuonekaasujen päästöjen kehitystä. -20 % ja -30 % kasvihuonekaasujen päästörajoitustavoitteilla myös rikkipäästöt jäävät pienemmiksi kuin 'Kioto'-skenaariossa, mikä johtuu etupäässä hiilen ja öljyn vähemmästä käytöstä.

Optimistisen teknologisen kehityksen skenaario -10 % kasvihuonekaasujen vähennystavoitteella muodostaa tarkastelussa poikkeuksen. Skenaariossa optimistinen teknologinen kehitys yhdessä lievähkön kasvihuonekaasujen rajoitusvaatimuksen kanssa mahdollistaa hiilen muita skenaarioita laajemman käytön pienen mittakaavan (alle 20 MW) CHP-laitoksissa. Pienen mittakaavan rikin ominaispäästöt ovat suuria laitoksia korkeammat, koska tehokkaiden pesurien asentaminen ei olisi kustannustehokasta eikä myöskään lainsäädäntö sitä vaadi.

Päästökaupan vaikutukset Suomen rikkipäästöihin jäävät mallilaskelmien perusteella melko vähäisiksi. Tavanomaisen kehityksen tapauksessa -20 % vähennystavoitteella Suomelle olisi kannattavaa ostaa päästöoikeuksia 6,2 Mton CO₂ vuonna 2030, kun taas optimistisessa skenaariossa Suomi tällöin voisi myydä päästöoikeuksia 1,9 Mton CO₂ (Lehtilä & Syri 2003). Tavanomaisen skenaarion suurempi kotimainen fossiilisten polttoaineiden käyttö aiheuttaisi noin yhden kilotonnin suuremmat rikkidioksidipäästöt vuonna 2030 kuin optimistisen kehityksen tapauksessa.

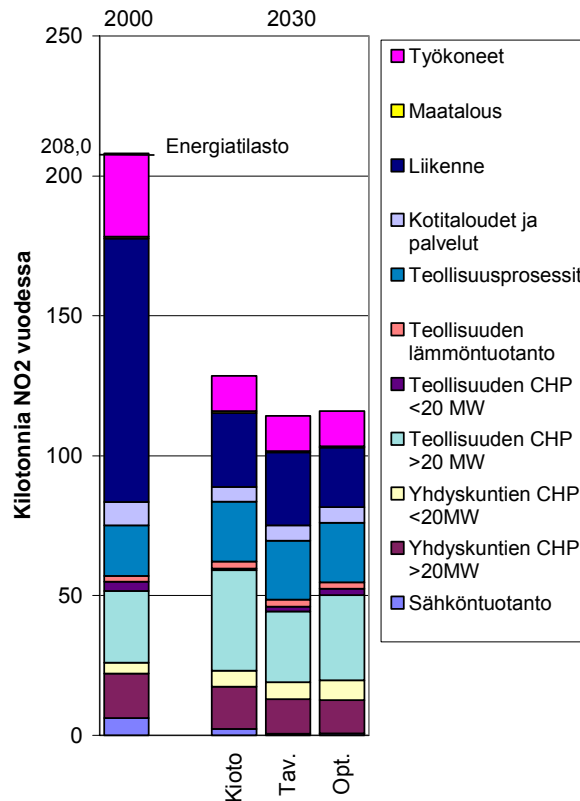
6.2 Typen oksidien päästöjen kehitys Suomessa

Typen oksidien päästöt Suomessa ovat vähentyneet melko tasaisesti 1990-luvun aikana. Vuoden 1990 kokonaispäästöt olivat 300 kilotonnia typpidioksidina ilmoitettuna. Vuoden 2000 tilastoidut kokonaispäästöt olivat 208 kilotonnia typpidioksidia (Tilastokeskus 2002). Liikenne (mukaan lukien työkoneet) aiheuttaa Suomessa yli puolet kokonaispäästöistä. 1990-luvulla tapahtunut pudotus kokonaispäästöjen määrässä johtuu sekä energiantuotannon että tieliikenteen päästöjen vähennyksistä.

Vuoden 2002 aikana VTT:n LIISA-mallin käyttämiin päästökertoimiin on tehty merkittäviä muutoksia (<http://lipasto.vtt.fi/>). Muutoksessa on päivitetty eri moottoritekniikoiden ominaispäästökertoimia vastaamaan entistä paremmin uusinta mittaus-tietoa. Päivityksessä typen oksidien päästökertoimet alenivat selkeästi aiempaan verrattuna. Tässä tutkimuksessa käytetyt liikenteen päästökertoimet perustuvat LIISA-mallin uusimpiin tietoihin.

Suomen typen oksidien päästöjen tulevaisuuden kehitys arvioitiin Climtech-ohjelman skenaarioissa vuoteen 2030 asti olettaen, että päästörajoitukset ja rajoitustekniikat säilyvät nykyisin tiedossa olevalla tasolla. Liikenteen osalta huomioitiin myös tiedossa

olevat tulevaisuuden tekniikoiden ominaisuudet ja päästömääräykset. Kuvassa 13 on esitetty Suomen typen oksidien päästöjen kehitys v. 2000–2030 tarkastelluissa Climtech-skenaarioissa (-20 % kasvihuonekaasujen vähennystavoitteella).



Kuva 13. Suomen typen oksidien päästöjen kehitys vuodesta 2000 vuoteen 2030 tarkastelluissa Climtech-skenaarioissa -20% kasvihuonekaasujen vähennystavoitteella. Päästöt on ilmoitettu typpidioksidina.

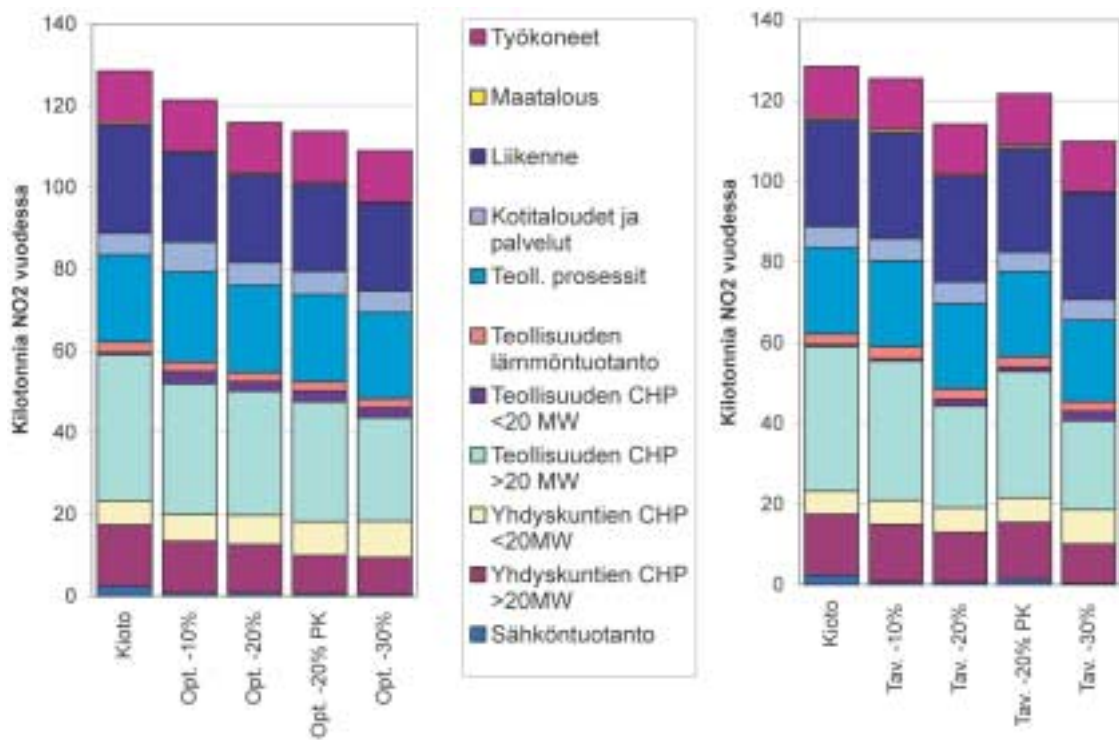
Suomen typen oksidien kokonaispäästöt vähenevät merkittävästi kaikissa tarkastelluissa skenaarioissa. Tämä johtuu liikenteen ja työkoneiden arvioidusta päästöjen vähene- misestä EU-normien vaatiman teknologisen paranemisen myötä liikennevälinekannan uusiutuessa. Liikenteen ja työkoneiden päästöjen muutos on vuoteen 2030 mennessä -68 % ... -73 % vuoden 2000 tasoon verrattuna.

Kuvasta 13 nähdään, että -20 % kasvihuonekaasujen vähentäminen alentaisi myös typen oksidien päästöjä 8–9 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna tilanteeseen, jossa vain Kioton pöytäkirja olisi toteutettu. Vähennemä johtuu pääosin suuren mittakaavan (yli 20 MW_{pa}) erillisen sähköntuotannon ja suuren mittakaavan (yli 20 MW_{pa}) yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon päästöjen laskusta verrattuna 'Kioto'-skenaarioon. Tämä johtuu siirtymisestä enenevässä määrin pienen mittakaavan tuotantoon. Toisaalta pienen

mittakaavan (alle 20 MW_{pa}) yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon päästöjen arvioidaan kasvavan jonkin verran suuremman tuotantomäärän vuoksi.

'Optimistinen'-skenaariossa myös liikenteen NO_x-päästöt vähenevät merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Muutos verrattuna 'Kioto'-skenaarioon on -18 %. Tämä johtuu siitä, että skenaariossa vuodesta 2020 alkaen siirrytään suuressa määrin konventionaalisista bensiini- ja dieselkäyttöisistä henkilöautoista hybridimoottoreihin ja polttokennoihin. Toinen merkittävä tekijä liikenteen kokonaispäästöjen vähenemisessä on siirtyminen vuodesta 2020 alkaen biokomponentteja sisältävien polttoaineiden käyttöön raskaassa tieliikenteessä. Biokomponenttien käytön moderneissa moottoreissa on havaittu tai arvioitu useimmiten vähentävän jonkin verran myös typen oksidien ja hiukkasten muodostumista (Euroopan komissio 2000, Ikonen et al. 2000).

Kuvassa 14 on esitetty typen oksidien kokonaispäästöt Suomessa vuonna 2030 kaikissa tarkastelluissa kasviuonekaasujen vähennysskenaarioissa.



Kuva 14. Suomen typen oksidien päästöt vuonna 2030 tarkastelluissa eri kasviuonekaasujen vähennysskenaarioissa optimistisen ja tavanomaisen teknologisen kehityksen tapauksissa. Päästökauppaskenaariossa (-20 % PK) optimistisen teknologiakehityksen tapauksessa Suomi myy CO₂-päästöoikeuksia, ja tavanomaisen kehityksen tapauksessa on kannattavaa ostaa oikeuksia. Vähennysprosentit viittaavat kasviuonekaasujen vähennystavoitteeseen vuonna 2030.

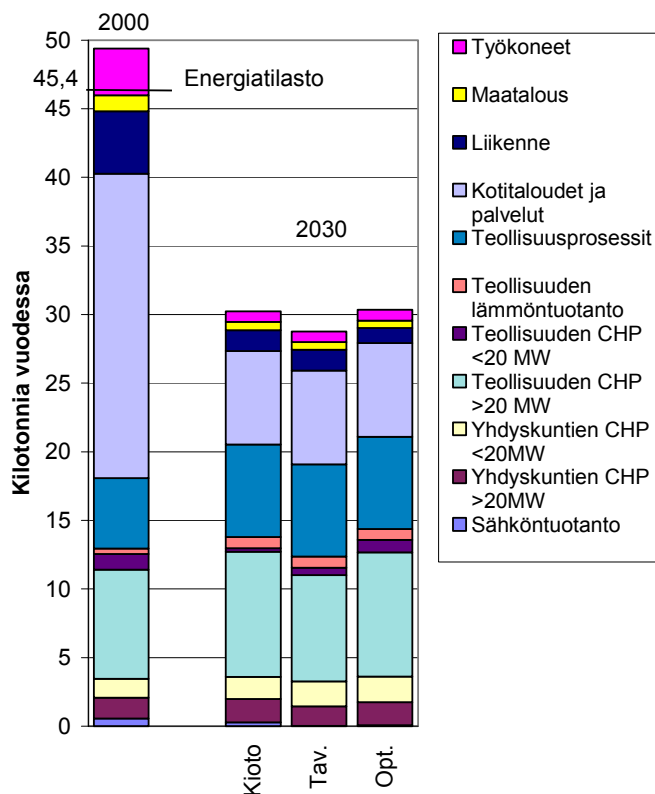
Kuvasta 14 voidaan nähdä, että typen oksidien päästöt seuraavat kasvihuonekaasujen päästöjen kehitystä. Kaikilla tarkastelluilla kasvihuonekaasujen päästöjen lisärajoitustavoitteilla myös typen oksidien kokonaispäästöt muodostuvat alhaisemmiksi kuin 'Kioto'-skenaariossa, ja typen oksidien päästöt laskevat sitä enemmän, mitä tiukemmin kasvihuonekaasuja rajoitetaan. Tämä johtuu tapahtuvista muutoksista erillisessä sähkön- tuotannossa, suuren kokoluokan (yli 20 MW) yhdyskuntien ja teollisuuden yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä optimistisessä teknologiaskenaariossa myös uusista liikenteen moottoritekniikoista. Tiukemmissa rajoitusskenaarioissa polttoaineiden kokonaiskulutus jää jonkin verran pienemmäksi. Polttoaineiden käytön väheneminen painottuu fossiilisiin polttoaineisiin, kun taas biopolttoaineiden käyttö uusilla tekniikoilla lisääntyy kasvihuonekaasujen päästörajoitusten tiukentuessa.

Päästökauppa vaikuttaisi mallilaskelmien perusteella selvästi Suomen typen oksidien päästöihin. Tavanomaisen kehityksen tapauksessa -20 % vähennystavoitteella Suomen olisi taloudellisesti kannattavaa ostaa päästöoikeuksia 6,2 Mton CO₂, kun taas optimistisessä skenaariossa Suomi voisi myydä päästöoikeuksia 1,9 Mton CO₂ (Lehtilä & Syri 2003). CO₂-päästöoikeuksia ostettaessa suurempi kotimainen fossiilisten polttoaineiden käyttö aiheuttaisi noin 7 % suuremmat typen oksidien päästöt vuonna 2030 kuin optimistisen kehityksen tapauksessa, jolloin oikeuksia myydään.

6.3 Hiukkaspäästöjen kehitys Suomessa

Suomen hiukkaspäästöt ovat laskeneet 1990-luvun aikana lähes puoleen vuoden 1990 tasosta. Tämä johtuu sekä energiasektorin että teollisuusprosessien ja tieliikenteen päästöjen vähenemisestä. Voimalaitossektorilla erityisesti hiiltä, öljyä ja turvetta käyttävien kattiloiden päästöt ovat pienentyneet merkittävästi puhdistusinvestointien myötä. Teollisuuden prosessipäästöjen määrä on pudonnut vuodesta 1990 vuoteen 2000 noin 70 prosenttia. Samalla ajanjaksolla tieliikenteen hiukkaspäästöt vähenivät lähes puoleen.

Kuvassa 15 on esitetty Suomen hiukkaspäästöjen (TSP) kehitys v. 2000–2030 tarkastelluissa Climtech-skenaarioissa -20% kasvihuonekaasujen vähennystavoitteella.

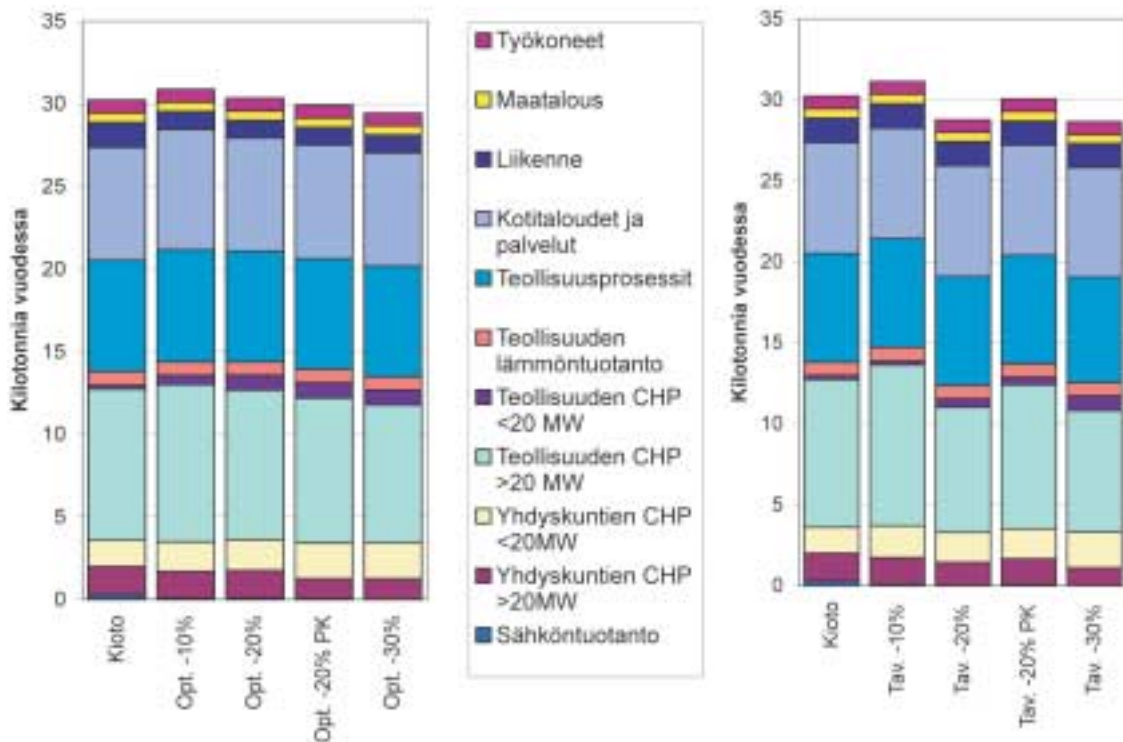


Kuva 15. Suomen hiukkaspäästöjen kehitys vuodesta 2000 vuoteen 2030 tarkastelluissa Climtech-skenaarioissa -20 % kasvihuonekaasujen vähennystavoitteella. Päästöt on ilmoitettu kokonaishiukkasmassana (TSP). Laskelmissa on oletettu pienkattiloiden ja tulisijojen vähittäinen korvautuminen pienempipäästöisillä malleilla.

Kuvasta 15 näkyy, että Suomen hiukkaspäästöt vähenevät vuoteen 2030 mennessä kaikissa skenaarioissa. Tämä johtuu etupäässä kotitaloussektorilla tapahtuvaksi oletetuista muutoksista. Mallilaskelmissa oletettiin, että kotitalouksien, kesämökkien ja kiinteistöjen lämmityksen kattilat uusiutuvat noin 20 vuoden ja tulisijat 40 vuoden syklillä. Lisäksi oletettiin, että vuodesta 2000 eteenpäin kaikissa uusittavissa kattiloissa ja tulisijoissa otetaan käyttöön nykyaikaisen tekniikan mukaiset ratkaisut. Työssä oletettiin myös, että vanhanaikaisella tekniikalla tapahtuva suuripäästöinen uunilämmitys käytännössä poistuisi vuoteen 2030 mennessä. Todellisuudessa kaikki kiinteistöjen kattilat eivät uusiudu oletetulla 20 vuoden syklillä, ja myös tulisijoista osa on oletettua 40 vuoden käyttöaikaa pitkäikäisempiä. Tältä osin päästöjen tulevaisuuden pieneneminen on laskelmissa yliarvioitua, ellei esim. lainsäädännöllä tehosteta laitekannan uusiutumista.

Toinen merkittävä sektori, jolla hiukkaspäästöjen vähenemistä tapahtuu, on liikenne. Liikenteen hiukkaspäästöjen vähenemä vuoteen 2030 mennessä kaikissa skenaarioissa on 67–76 % vuoden 2000 tasosta. Tämä johtuu EU-normien vaatimasta teknologisesta

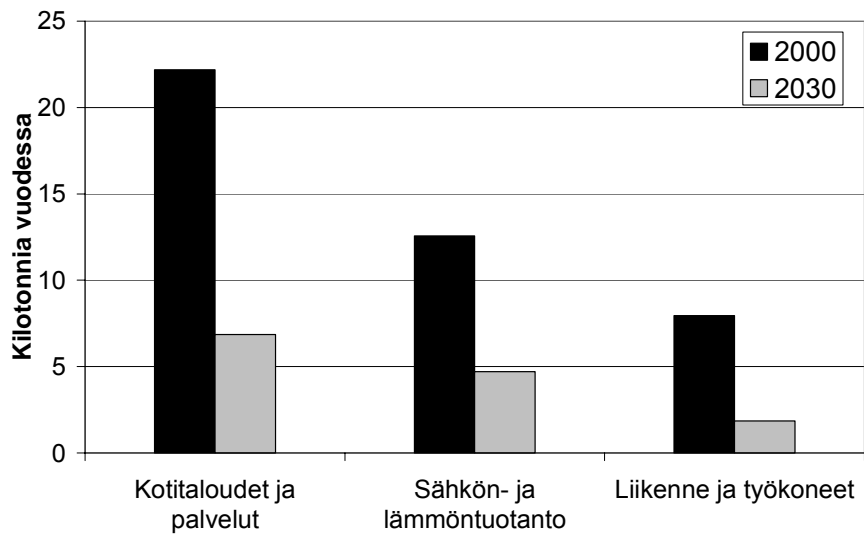
paranemisesta liikennevälinekannan uusiutuessa. Liikennesektorin päästöt ovat pienimmät 'Optimistinen'-skenaariossa. Koska uusien bensiinimoottoritekniikoiden hiukkaspäästöt ovat jo muutenkin erittäin pienet, johtuu vähenemä etupäässä muutoksista dieselmoottorien käytössä. Henkilöautoissa siirrytään 'Optimistinen'-skenaariossa hybridimoottoreihin ja polttokennoihin ja rekkaliikenteessä biokomponentteja sisältävien polttoaineiden käyttöön. Erityisesti hiukkaspäästöjen on havaittu tai arvioitu vähenevän biokomponenttien käytön myötä moderneissa moottoreissa verrattuna tavanomaisiin dieselpolttoaineisiin (Euroopan komissio 2000, Ikonen et al. 2000). Vertailua sekä diesel- ja bensiinimoottorien että biokomponenttien hiukkaspäästöominaisuuksien välillä kuitenkin mutkistaa se, että hyvin pienten hiukkaskokoluokkien kannalta päästöominaisuudet voivat olla aivan erilaiset kuin kokonaisuudessaan osalta (esim. Ikonen et al. 2000). Tähän tulisi jatkotutkimuksissa kiinnittää huomiota. Kuvassa 16 on esitetty kokonaishiukkaspäästöt Suomessa vuonna 2030 kaikissa tarkastelluissa kasvihuonekaasujen vähennysskenaarioissa.



Kuva 16. Suomen hiukkaspäästöt vuonna 2030 tarkastelluissa kasvihuonekaasujen vähennysskenaarioissa optimistisen ja tavanomaisen teknologisen kehityksen tapauksissa. Päästökauppaskenaariossa (-20 % PK) optimistisen teknologiakehityksen tapauksessa Suomi myy CO₂-päästöoikeuksia, ja tavanomaisen kehityksen tapauksessa on kannattavaa ostaa oikeuksia. Vähennysprosentit viittaavat kasvihuonekaasujen vähennystavoitteeseen vuonna 2030.

Kuvasta 16 voidaan nähdä, että tiukemmat kasvihuonekaasujen päästörajoitukset aiheuttaisivat vähemmän rakenteellisia sivuhyötyjä hiukkaspäästöissä kuin rikin ja typen oksidien päästöissä. Tämä johtuu siitä, että kasvihuonekaasujen vähentämisen sivuhyödyt energiantuotanto- ja teollisuussektoreilla pyrittiin arvioimaan konservatiivisesti, eli tutkimuksessa ei oletettu 'automaattisesti' tapahtuvaa ominaispäästöjen pienenemistä ajan mittaan teknologian ja käyttötaidon kehittyessä, vaan ainoastaan nykyisin tiedossa olevat tyypilliset päästötasot. Tällöin vielä nykyisin biomassan poltossa toteutuvat suurehkot ominaispäästötasot suhteessa suuriin fossiilisia polttoaineita käyttäviin laitoksiin korostuvat tuloksissa. Todellisuudessa näin pitkillä ajanjaksoilla teknologian ja käyttötaidon kehittymisen merkitys voi kuitenkin olla hyvin suuri.

Työssä arvioitiin erillisillä skenaariolaskelmilla alustavasti myös hiukkaspäästöjen suhteellisia vähentämispotentiaaleja keskeisimmillä eri sektoreilla Suomessa. Kuvassa 17 on esitetty Suomen keskeisille hiukkaspäästöjä tuottaville sektoreille arvio vähennyspotentiaalista vuoteen 2030 mennessä nykyisin käytössä olevin tekniikoin Climtechin optimistisen teknologisen kehityksen skenaariossa. Suurille polttolaitoksille tehtiin raportoitujen laitostietojen avulla (Ohlström 1998) alustava arvio teoreettisesta päästöjen vähentämispotentiaalista nykyisin käytössä olevin teknisin keinoin (ei lainsäädännön tiukennuksia nykytasosta) olettamalla nykyisin käytössä olevien vähennys-tekniikoiden taso ja niiden jatkuva optimaalinen toiminta (kuva 17). Liikenteen osalta kuvattiin tällä hetkellä päätettyjen moottoritekniikoita koskevien päästövaatimusten sekä uusien teknologioiden arvioidut vaikutukset Climtechin 'Optimistinen'-teknologia-skenaariossa (uudet polttoaineet, polttokennot jne). Kotitalous- ja palvelusektorin osalta oletettiin, että kotitalouksien, kesämökkien ja kiinteistöjen lämmityksen kattilat uusitaan 20 vuoden ja tulisijat 40 vuoden syklillä. Lisäksi oletettiin, että kaikki käyttöön otettavat lämmityskattilat ja tulisijat edustavat tällä hetkellä polttoteknisillä keinoilla saavutettavia päästötasoja. Kaikkien sektorien kehitys on kuvassa 17 Climtechin 'Optimistinen'-teknologiaskenaarion mukainen.



Kuva 17. Eri sektorien arvioitu hiukkaspäästöjen (TSP) vähennyspotentiaali Suomessa vuosina 2000–2030 optimistisessä teknologiaskenaariossa.

Suomen hiukkasten kokonaispäästöistä suurin vähennyspotentiaali on epäilemättä pienen mittakaavan polton päästöjen vähentämisessä, kuten kuva 17 indikoi. Myös liikennesektorin teknologisilla muutoksilla on saavutettavissa pitkällä tähtäimellä merkittäviä vähennyksiä sekä pienhiukkasten että kasvihuonekaasujen päästöissä. Liikenteen teknologiset muutokset ovat kuitenkin luonteeltaan hitaampia ja vaikeammin säädeltävissä pelkästään kotimaisilla toimilla.

Kuva 17 indikoi, että myös energiantuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa on mahdollista vähentää hiukkaspäästöjä nykyisestä. Merkittävä osa näiden sektorien hiukkaspäästöistä aiheutuu häiriötilanteista ja puhdistuslaitteistojen epäoptimaalisesta toiminnasta erityisesti pienempien kokoluokkien laitoksissa. Kuvassa 17 on sähkön- ja lämmöntuotannolle esitetty hypoteettinen arvio, sillä sekä energia- että teollisuussektorin sähkön- ja lämmöntuotannon päästöjen on laskelmassa oletettu kehittyvän tulevaisuudessa vastaamaan ko. laitosten nykyisillä asennetuilla vähennys- tekniikoilla parhaita saavutettavissa olevia päästötasoja. Arvio heijastaa sitä, miten merkittävä osa hiukkaspäästöistä aiheutuu häiriötilanteista ja puhdistuslaitteistojen epäoptimaalisesta toiminnasta. Tämä on tärkeää erityisesti pienehkön kokoluokan laitoksissa.

6.4 Tulosten epävarmuudet

6.4.1 Rikin ja typen oksidien päästöt

Suomen päästöjen mallinnuksessa kasvihuonekaasujen vähennysskenaarioissa oletettiin rikin ja typen oksidien päästöjen osalta ainoastaan tämänhetkinen lainsäädäntö (mukaan lukien EU-tasolla päätetyt uudet säädökset). Tulokset on tarkoitettu ainoastaan tuottamaan tietoa odotettavissa olevista sivuhyödyistä vähennettäessä kasvihuonekaasujen päästöjä sekä tunnistamaan mahdollisia riskitekijöitä eli ratkaisuja, jotka lisäisivät muiden ilmansaasteiden päästöjä. On todennäköistä että rikin ja typen oksidien päästötasot tulevat laskemaan tarkastelun aikajaksolla muuttuvan lainsäädännön ja muiden tekijöiden, kuten teknologian kehittymisen johdosta. Typen oksidien päästökehitys määräytyy merkittävästi myös sen mukaan, miten nopeasti vanhimmat ajoneuvoluokat poistuvat käytöstä Suomessa.

Suomen rikkipäästöjen mallinnuksessa EFOM-mallilla pyrittiin mallintamaan keskimääräistä Suomessa vallitsevaa energiantuotannon ja -käytön tilannetta. Tämän johdosta vuoden 2000 mallinnetut päästöt eivät täysin vastaa todellisuudessa toteutuneita poikkeuksellisen lämpimän ja sateisen kauden 2000 päästöjä.

Mallinnuksessa pyrittiin arvioimaan konservatiivisesti uuden teknologian sivuhyödyt, eli tulevaisuudessa tapahtuva 'automaattinen' paraneminen teknologisen kehityksen ja jatkuvasti paranevan käyttötavan myötä energiantuotannon ja teollisuuden lähteiden ominaispäästöissä oletettiin hyvin pieneksi. On todennäköistä, että sivuhyödyt koskien erityisesti energiantuotannon ja teollisuuden pistelähteitä ovat todellisuudessa tämän tutkimuksen arvioita suuremmat.

6.4.2 Hiukkaspäästöt

Pienhiukkasten päästöt erityisesti pienlähteistä tunnetaan vielä tällä hetkellä hyvin huonosti. Lisäksi päästötasoon vaikuttaa erittäin paljon tulisijan tai kattilan käyttötapa. Huono polttotapa tai huonolaatuinen polttoaine voi kymmenkertaistaa päästöt. Tässä työssä käytetyt pientulisijojen päästökertoimet olivat jonkin verran korkeammat kuin esim. Kuopion yliopiston hiljattain tekemät mittaukset (Hytönen et al. 2002).

Myös hiukkaspäästöjen mallinnuksessa pyrittiin arvioimaan konservatiivisesti uuden teknologian sivuhyödyt, eli tulevaisuudessa tapahtuva 'automaattinen' paraneminen kiinteiden lähteiden ominaispäästöissä oletettiin hyvin pieneksi. Ainoastaan pienen mittakaavan poltolle (kotitalous- ja palvelusektorit) oletettiin vaiheittainen siirtyminen

parempiin polttotekniikoihin. On todennäköistä, että sivuhyödyt erityisesti energiantuotannon ja teollisuuden päästölähteissä ovat pitkällä aikajänteellä tämän tutkimuksen arvioita suuremmat. Hiukkaspäästöjen osalta tätä tutkittiin olettamalla vaihtoehtoisesti, että energiantuotannon ja teollisuuden polttoprosessien ominaispäästöt pienentyisivät tulevaisuudessa tasoille, jotka on mahdollista saavuttaa käytössä olevin tekniikoin. Tämä vastasi hypoteettista tilannetta, jossa epäoptimaalisen käytön ja toimintahäiriöiden osuudet on eliminoitu päästöistä.

Tutkimuksessa arvioitiin kokonaishiukkaspäästöjä sekä PM_{2,5}-hiukkasjakeen päästöjä. PM_{2,5}:n osuudet kokonaishiukkaspäästöistä eri polttoaineilla, polttotekniikoilla sekä vähennystekniikoilla tunnetaan kuitenkin vielä hyvin puutteellisesti, ja arvioissa on suuria epävarmuuksia. Johtuen puutteellisesta lähtötiedosta tutkimuksessa ei myöskään pyritty arvioimaan vielä pienempien hiukkaskokoluokkien kokonaispäästöjä. Viime aikojen terveysvaikutusten tutkimus on kuitenkin antanut viitteitä, että terveysvaikutusten kannalta olennaisimpia saattavat olla juuri pienimmät hiukkaskoot. Tähän tulisi jatkotyössä kiinnittää huomiota.

Hiukkaspäästöjen kokonaisarvioita ei myöskään tulisi sellaisenaan käyttää indikoimaan esimerkiksi väestön terveydelle aiheuttavia riskejä. Olennaisia komponentteja riskin arvioinnissa ovat hiukkasten kokojakauman lisäksi muun muassa hiukkasten kemiallinen koostumus sekä mahdolliset karsinogeeniset ominaisuudet. Kokonaispäästömäärät eivät myöskään kuvaa pitoisuuksia, joille väestö todellisuudessa altistuu. Esimerkiksi suuren kokoluokan energiantuotannon laitosten savukaasut laimentuvat tehokkaasti ilmakehässä, kun taas taajamaliikenteen päästöille altistutaan erittäin merkittävässä määrin suoraan katutasossa.

7. Johtopäätökset

7.1 Globaalit sivuhyödyt

Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämistoimet voivat aiheuttaa erittäin tuntuvia myönteisiä sivuvaikutuksia muiden ilmansaasteiden vähenemisenä ja siten paikallisen ja alueellisen ilmanlaadun paranemisenä. Suurimmat suhteelliset hyödyt ovat odotettavissa kehittyvissä maissa, joissa käytössä olevaa vanhentunutta ja puutteellista tekniikkaa (esim. fossiilisia polttoaineita käyttäviä energiantuotanto- ja teollisuuslaitoksia ilman asianmukaista savukaasujen puhdistustekniikkaa) korvataan uudella, tehokkaammalla ja puhtaammalla teknologialla. Näitä ovat esimerkiksi korkean hyötysuhteen kaasui- tai biomassalaitokset ja muu uusiutuviin energianlähteisiin perustuva moderni teknologia. Suurimmat kansainvälisissä tutkimuksissa löydetty odotettavissa olevat sivuhyödyt tällaisista kasvihuonekaasujen vähennystoimista ovat olleet peräisin hiukkaspäästöjen vähenemisestä ja siten väestön terveyshaittojen pienenemisestä. Koska haitallisille ilmansaasteille altistumisen on arvioitu aiheuttavan vuosittain kehitysmaissa lähes kolme miljoonaa ennen aikaista kuolemaa sekä erittäin laajoja haitallisia terveysvaikutuksia, voivat globaaleilla ilmastotoimilla lähivuosisikymmeninä saavutettavissa olevat konkreettiset sivuhyödyt väestön terveydelle olla erittäin merkittäviä.

Tässä tutkimuksessa tarkastellut kehittyvien maiden CO₂-vähennystoimet painottuivat lähitulevaisuudessa kohtuullisin (tai jopa negatiivisin) kustannuksin toteutettavissa oleviin toimiin, kuten energiankäytön tehostamiseen ja polttoaineen vaihtoon energiantuotannossa, teollisuudessa, liikenteessä sekä kotitalous- ja palvelusektorilla. Maissa, joissa ympäristönsuojeluun ja savukaasujen puhdistukseen on jo investoitu paljon, odotettavissa olevat suhteelliset sivuhyödyt ovat vaatimattomampia. Toisaalta ilman- suojeluun jo merkittävästi investoineissa maissa teknisillä lisävähennyksillä olisi tyypillisesti korkeat ominaiskustannukset.

Kioton pöytäkirjan toteuttaminen EU:ssa alentaisi huomattavasti erityisesti rikin, mutta myös typen oksidien päästöjä. Pienhiukkasten päästöjen rakenteellinen aleneminen EU-maissa Kioton pöytäkirjan toteuttamisen myötä riippuu olennaisesti maakohtaisista kasvihuonekaasujen vähennysstrategioista. Vanhojen fossiilisia polttoaineita käyttävien energiantuotantolaitosten modernisointi tai korvaaminen tehokkaammalla teknologialla vähentää tehokkaasti myös hiukkaspäästöjä, samoin kuin siirtyminen päästöttömiin energiamuotoihin. Sen sijaan useissa maissa kaavailtu siirtyminen biopolttoaineisiin ja biomassan hyödyntämiseen vaatii modernin poltto- ja/tai puhdistusteknologian vähentääkseen hiukkasten ja haihtuvien hiilivetyjen päästöjä. Erityisesti siirtyminen suuren kokoluokan fossiilisia polttoaineita käyttävästä, savukaasun puhdistimilla

varustetusta tuotannosta pienemmän mittakaavan biopolttoaineiden hyödyntämiseen vaatii panostusta poltto- ja puhdistustekniikkaan.

Prioriteetit teknologioiden eri ominaisuuksien välillä vaihtelevat maiden välillä. Painotukset esim. eri ilmansaasteiden päästöjen vähentämissuhteiden välillä riippuvat ko. ongelmien vakavuudesta alueella. Keski-Euroopassa, erityisesti Benelux-maiden alueella alailmakehän otsoni (jota muodostuu typen oksideista ja VOC:sta), ilman kautta kulkeutuva rehevöittävä typpilaskeuma sekä pienhiukkasten korkeat pitoisuudet ovat erittäin vakavia ongelmia. Esimerkiksi Hollannin ympäristöpolitiikassa typen, VOC:ien ja hiukkasten päästöjen rajoittaminen ovat korkealla prioriteetilla (ECN-RIVM, 2000). Käytännössä tämä tarkoittaa esim. ilmastomuutosta hillitsevälle teknologialle korkeita vaatimuksia typpioksiidi-, VOC- ja hiukkaspäästöjen suhteen.

7.2 Skenaariotulokset Suomelle

Tutkimuksessa tarkasteltiin vuoteen 2030 asti ulottuvia skenaarioita Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisesta. VTT:n EFOM-mallin avulla laskettiin erilaisia kehityspolkuja, joissa Suomen kasvihuonekaasujen päästöjä rajoitettiin mahdollisimman kokonaisedullisella tavalla. Malli laski samalla tapahtuvat muutokset muiden ilmansaasteiden päästöissä. Mallitarkastelut osoittivat, että kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamistoimenpiteillä voidaan saavuttaa myös merkittäviä sivuhyötyjä muiden ilmansaasteiden päästöjen vähentämisessä.

Kioton pöytäkirjaa tiukempi kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen vähentäisi rikkipäästöjä merkittävästi. Rajoitettaessa kasvihuonekaasujen päästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä rikkipäästöjen rakenteellinen vähenemä olisi 11–16 % verrattuna tilanteeseen, jossa Suomi toteuttaa ainoastaan Kioton pöytäkirjan. Rikkipäästöjen pieneneminen tapahtuu etupäässä erillisessä sähköntuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, ja pääsyyinä on hiilen ja turpeen käytön väheneminen.

Suomen typen oksidien kokonaispäästöt vähenevät merkittävästi kaikissa tarkastelluissa skenaarioissa. Tämä johtuu liikenteen ja työkoneiden arvioidusta päästöjen vähentämisestä EU-normien vaatiman teknologisen paranemisen myötä liikennevälinekannan uusiutuessa asteittain. Liikenteen ja työkoneiden päästöjen muutos oli mallilaskelmissa vuoteen 2030 mennessä -68...-73 % vuoden 2000 tasoon verrattuna.

Kasvihuonekaasujen rajoittaminen Kioton pöytäkirjan tasoa alemmas vähentäisi myös typen oksidien päästöjä. Vähenemä olisi 8–9 % vuoteen 2030 mennessä -20 % kasvihuonekaasujen rajoitusskenaariossa verrattuna tilanteeseen, jossa vain Kioton pöytäkirja

olisi toteutettu. Vähennemä johtuu pääosin suuren mittakaavan (yli 20 MW_{pa}) erillisen sähköntuotannon ja suuren mittakaavan (yli 20 MW_{pa}) yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon päästöjen pienenemisestä verrattuna 'Kioto'-skenaarioon. 'Optimistinen'-skenaariossa myös liikennesektorin NO_x-päästöt vähenevät 18% verrattuna 'Kioto'-skenaarioon vuoden 2030 tilanteessa. Tämä johtuu siitä, että skenaariossa vuodesta 2020 alkaen siirrytään voimakkaasti konventionaalisisista bensiini- ja dieselkäyttöisistä henkilöautoista hybridimoottoreihin ja polttokennoihin. Toinen tekijä liikenteen kokonaispäästöjen vähenemisessä on siirtyminen vuodesta 2020 alkaen biokomponentteja sisältävien polttoaineiden käyttöön raskaassa tieliikenteessä, jonka on arvioitu useimmiten vähentävän myös typen oksidien ja hiukkasten muodostumista moderneissa moottorityypeissä.

Mallilaskelmat indikoivat että Suomen hiukkaspäästöt voivat vähentyä vuoteen 2030 mennessä kaikissa skenaarioissa, mikäli kotitalouksien, kesämökkien ja kiinteistöjen lämmityksen tulisijoja ja kattiloita uusitaan nykyaikaisen tekniikan mukaisilla ratkaisuilla ja tulisijojen oikeaan käyttöön panostetaan. Laskelmissa oletettiin kotitalouksien ja kiinteistöjen kattila- ja tulisijakannan uusiutuvan 20–40 vuoden syklillä. Suomen hiukkasten kokonaispäästöistä suurin vähennyspotentiaali on epäilemättä pienen mittakaavan polton päästöjen vähentämisessä.

Myös liikennesektorin teknologisilla muutoksilla on saavutettavissa pitkällä tähtäimellä merkittäviä vähennyksiä sekä pienhiukkasten että kasvihuonekaasujen päästöissä. Liikenteen hiukkaspäästöjen vähennemä vuoteen 2030 mennessä kaikissa skenaarioissa on 67–76 %. Tämä johtuu EU-normien vaatimasta teknologisesta paranemisesta liikennevälinekannan uusiutuessa. Lisävähennemä 'Optimistinen'-skenaariossa johtuu dieselmoottorien käytön vähenemisestä siirryttäessä hybridimoottoreihin ja polttokennoihin sekä biokomponenttien käyttöön raskaassa liikenteessä. Liikenteen teknologiset muutokset ovat kuitenkin luonteeltaan hitaampia ja vaikeammin säädeltävissä pelkästään kotimaisilla toimilla.

Myös energiantuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa on mahdollista vähentää hiukkaspäästöjä nykyisestä. Merkittävä osa näiden sektorien hiukkaspäästöistä aiheutuu häiriötilanteista ja puhdistuslaitteistojen epäoptimaalisesta toiminnasta erityisesti pienempien kokoluokkien laitoksissa. Sähkön- ja lämmöntuotannolle laskettiin myös hypoteettinen skenaario, jossa sekä energia- että teollisuussektorin sähkön- ja lämmöntuotannon päästöt kehittyvät tulevaisuudessa vastaamaan ko. laitosten nykyisillä asennetuilla vähennystekniikoilla parhaita saavutettavissa olevia päästötasoja. Arvio heijastaa sitä, miten merkittävä osa hiukkaspäästöistä aiheutuu häiriötilanteista ja puhdistuslaitteistojen epäoptimaalisesta toiminnasta. Tämä on tärkeää erityisesti pienehkön kokoluokan laitoksissa.

7.3 Teknologioiden potentiaalit ja vaikutukset ilmansaasteisiin

Taulukoissa 8 ja 9 on esitetty Climtech-ohjelman Suomea koskevien kokonais-tarkastelujen tuloksia eri teknologioiden potentiaaleista kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisessa (Lehtilä & Syri 2003). Taulukkoihin on koottu myös ko. teknologioiden vaikutukset muiden ilmansaasteiden päästöihin. Vaikutukset ilmansaasteiden päästöihin on arvioitu lyhyelle aikavälille ja ottaen huomioon eri tekniikoita koskeva tämänhetkinen päästölainsäädäntö.

Taulukko 8. Energiantuotantoteknologioiden merkitys sähkön- ja lämmöntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä Suomessa nykytilanteeseen verrattuna sekä teknologioiden vaikutus muiden ilmansaasteiden päästöihin. Sovelluskohtainen teknologian vaikutus päästöihin on arvioitu pitkälle aikavälille.

	Merkitys kasvihuonekaasujen päästöille vuonna 2010	Merkitys kasvihuonekaasujen päästöille vuonna 2030	Vaikutus ilmansaasteiden päästöihin		
			SO ₂	NO _x	PM
Poltettavat energialähteet					
Sähköntuotannon hyötysuhteen nosto	■	■■	–	–	–
Yhteistuotannon lisääminen	■	■	–	–	–
Yhteistuotannon rakennusasteen nosto	■■	■■	–	–	–
Kiinteiden polttoaineiden kaasutus	■■	■■■	–	–	–
Verkkoon kytketyt polttokennot	0	■	–	–	–
Maakaasukombi- ja -moottoritekniikat	■■■	■■	–	–	–
Polttotekniikat kiinteille bio- ja REF-polttoaineille	■■■	■■■	–	0	*
Pienen mittakaavan biomassan poltto	■■	■■	–	0	*
Hiilidioksidin poisto savukaasuista ja loppusijoitus	0	■	0	0	0
Muut uusiutuvat energialähteet					
Vesivoiman lisääminen	■	■	–	–	–
Tuulivoiman lisääminen	■■	■■■	–	–	–
Aurinkosähkö (verkkoon kytketty)	0	■	–	–	–
Aurinkokaukolämpö	■	■	–	–	–
Ydinvoima					
Perinteiset ja kehittyneet reaktoritekniikat	■■■■	■■■■	–	–	–

■ = pieni (< 1 %), ■■ = kohtalainen (1–2 %),

■■■ = huomattava (2–5 %), ■■■■ = suuri (> 5 %)

+ = lisäävä, – = vähentävä, 0 = ei vaikutusta, * vaatii panostusta poltto- ja puhdistustekniikkaan

Taulukko 9. Energian loppukäyttöä tehostavien keinojen merkitys kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä ja vaikutus muihin ilmansaasteisiin.

	Merkitys kasvihuonekaasujen päästöille vuonna 2010	Merkitys kasvihuonekaasujen päästöille vuonna 2030	Vaikutus ilmansaasteiden päästöihin		
			SO2	NOx	PM
Teollisuuden energiankäyttö					
Energiatehokkuutta parantavat keinot					
- tehokkaammat sähkölaitteet	■	■■	-	-	-
- prosessiohjauksen parantaminen	■	■■	-	-	-
- lämmön talteenotto	■	■■	-	-	-
Polttoaineen vaihto (suora polttoaineiden käyttö prosesseissa)					
- maakaasuun	■	■■	-	0	-
- bioenergiaan (esim. kalkkiuuneissa)	■■	■■	-	*	*
Uudet teknologiat ja prosessit	■■	■■■	-	-	-
Energiaintensiivisten materiaalien korvaaminen (esim. betoni puulla)	■	■■	-	-	-
Materiaalikierrätyksen lisääminen (esim. metallit)	■■	■■■	-	-	-
Asuntojen ja palvelujen energiankäyttö					
Eristyksen ja ilmanvaihdon parantaminen	■■	■■■	-	-	-
Energiatehokkaammat lämmityslaitteet	■	■■	-	-	-
Vaihtoehtoiset energialähteet					
- bioenergia (esim. puujalosteet)	■■	■■	-	*	*
- lämpöpumput	■	■	-	-	-
- aurinkolämpö	■	■■	-	-	-
- aurinkosähkö	■	■	-	-	-
Tehokkaammat sähkölaitteet					
- kylmälaitteet	■	■	-	-	-
- valaistus	■■	■■	-	-	-
- muut	■	■■	-	-	-
Liikenteen energiankäyttö					
Kehittyneemmät teknologiat ja polttoaineet					
- polttomoottoritekniikan kehittäminen	■	■	-	-	-
- dieselautojen lisääminen	■	0	0	-	+
- maa- ja nestekaasubussit	■	■	-	-	-
- biopoltonesteet	■	■■	-	-	-
- sähkö- ja hybridautot	■	■■	-	-	-
- polttokennoautot (metanoli)	0	■■■	-	-	-
Liikennejärjestelmän parantaminen					
- yhdyskuntarakenteen tiivistäminen	■	■■	-	-	-
- kuljetusten logistiikan parantaminen	■	■■	-	-	-
Käyttötymiseen liittyvät mahdollisuudet					
- ajotapakoulutus	■	■	-	-	-
- kuljetusvälineen valintaan vaikuttaminen	■	■■	-	-	-

■ = pieni (< 1 %), ■■ = kohtalainen (1–2 %),

■■■ = huomattava (2–5 %), ■■■■ = suuri (> 5 %)

+ = lisäävä, - = vähentävä, 0 = ei vaikutusta, * vaatii panostusta poltto- ja puhdistustekniikkaan

Taulukoista voidaan nähdä, että useimmat kasvihuonekaasujen päästöjä Suomessa vähentävät teknologiset ratkaisut alentaisivat myös muiden ilmansaasteiden päästöjä verrattuna nykytilanteeseen. Energiankäyttöä tehostavilla toimilla on välillisiä myönteisiä vaikutuksia muiden ilmansaasteiden päästöihin, mikäli energiaa tuotetaan päästöjä aiheuttavilla tuotantomuodoilla. Merkittävin toimi, joka vaatii panostusta poltto- ja puhdistusteknologiaan, on siirtyminen suuren mittakaavan hiileen ja kaasuun pohjautuvasta sähkön- ja lämmöntuotannosta biomassan käyttöön, erityisesti jos käyttö tapahtuu pienemmissä yksiköissä.

Pienen mittakaavan biopolttoaineiden vähäpäästöisen teknologian hyödyntämiseen panostaminen parantaa sekä mahdollisuuksia kasvihuonekaasujen päästöjen alentamiseen kotimaassa että suomalaisten laitevalmistajien mahdollisuuksia viennin lisäämiseen. Monissa Euroopan maissa biopolttoaineiden käytön lisääminen on eräs keskeisimmistä kaavailluista kasvihuonekaasujen päästöjen vähennystoimista. Lisäksi EU:n uudet direktiivit ja ehdotukset asettavat kunnianhimoisia tavoitteita biopolttoaineiden osuuden lisäämiselle lähivuosina (EU 2001c, VHK 2002). EU-maiden laitemarkkinoille pääsy edellyttää korkeatasoista polttoteknologiaa (Helynen & Oravainen 2002). Biopolttoaineiden hyödyntämisen teknologia tarjoaa siis sekä houkuttelevia kasvunäkymiä että konkreettisia kehityshaasteita.

7.4 Jatkotutkimustarpeet

Hiukkasten päästöjen osalta tässä työssä keskityttiin arvioimaan polttoaineiden polton ja teollisuuden prosessien kokonaishiukkasten (TSP) päästöjä. Lisäksi laskenta kehitettiin PM_{2,5}-hiukkasten päästöille. PM_{2,5}-hiukkasjakeen osuuksista kokonaishiukkaspäästöissä ei kuitenkaan ole ollut saatavilla kattavaa Suomen oloihin soveltuvaa tietoa, joten tässä työssä keskityttiin raportoimaan tulokset kokonaishiukkaspäästöjen osalta. Viime aikojen terveysvaikutustutkimus on kuitenkin antanut viitteitä siitä, että tärkeimpiä hiukkaskokoluokkia haitallisten terveysvaikutusten kannalta ovat vielä pienemmät hiukkaskokoluokat, kuten PM_{1,0} tai jopa PM_{0,1}. Näiden päästöistä on olemassa vielä vähemmän tietoa kuin PM_{2,5}:stä. Jatkossa tulisikin mittaustutkimuksissa painottaa myös pienten hiukkasjakeiden osuuksien selvittämistä.

Kaikkien hiukkaskokojen päästöt erityisesti pienlähteistä tunnetaan vielä tällä hetkellä hyvin huonosti. Lisäksi päästötasoon vaikuttaa erittäin paljon tulisijan tai kattilan käyttötapa. Huono polttotapa tai huonolaatuinen polttoaine voi kymmenkertaistaa päästöt. Kattavaa mittaustietoa eri pienlähteiden hiukkaspäästöistä Suomen oloissa ei ole ollut saatavilla luotettavia päästöjen kokonaisarvioita varten. Työn tulokset hiukkasten osalta tulisikin päivittää, kun parempaa mittaustietoa on saatavilla.

Paremmen hiukkaspäästöjen tietämyksen myötä erityisesti pienlähteiden kuvausta EFOM-mallissa tulisi tarkentaa nykyisestä. Yhdessä tarkempien pienpäästöjen lähdeinventaarien kanssa tämä mahdollistaisi myös päästölainsäädännön ehdotusten vaikutusten luotettavan ja yksityiskohtaisen tarkastelun.

Myös alueellisten ilmansaasteiden ilmastolliset vaikutukset ovat tärkeä jatkotutkimuksen kohde. Toistaiseksi esimerkiksi IPCC:n ilmastoennusteissa käytetään melko karkeita arvioita alueellisten ilmansaasteiden päästöille ja pitoisuuksille ilmakehässä. Ne ovat merkittäviä tekijöitä alueellisessa ilmaston muuttumisessa, vaikka eri komponenttien vaikutukset tunnetaankin vielä puutteellisesti. Tiedon tarkentuminen palvelisi sekä entistä tarkempia ennusteita ilmaston muuttumisesta että mahdollisesti myös hidastamis- ja torjuntatoimien mahdollisimman tehokasta ja kokonaisedullisinta suuntaamista.

8. Yhteenveto

Tässä hankkeessa selvitettiin lyhyen ja keskipitkän aikavälin (noin vuoteen 2030) keskeisimpien kasvihuonekaasujen vähennystoimien suoria sivuvaikutuksia muiden ilmansaasteiden päästöihin. Työ tehtiin VTT Prosesseissa osana Tekesin CLIMTECH-tekniologiaohjelmaa. Näkökulmina olivat suomalainen ja Euroopan laajuinen sekä soveltuvilta osin globaali. Työn globaali osuus perustui kirjallisuuteen ja raportoituihin tutkimuksiin aiheesta. Työn Suomea koskevassa osassa käytettiin VTT:n EFOM-ENV-energiajärjestelmämallia arvioimaan, mitä muutoksia ilmansaasteiden päästöissä on odotettavissa kasvihuonekaasujen vähentämistoimenpiteiden myötä. Työssä laajennettiin Suomen EFOM-mallia kattamaan myös hiukkaspäästöjen laskenta (kokonaishiukkaset ja PM_{2,5}). Lisäksi työssä päivitettiin jo olemassa olevat rikin ja typen oksidien laskentaa koskevat laskentarutiinit ja tietokannat vastaamaan uusinta tietämystä rajoitustekniikoiden ominaisuuksista. Samoin huomioitiin uusimmat lisäykset ja muutokset ilmansaasteiden päästöjä koskevassa lainsäädännössä. EFOM-mallilla tarkasteltiin vuoteen 2030 ulottuvia skenaarioita.

EFOM-mallilla laskettiin erilaisia energiajärjestelmän kehityspolkuja, joissa Suomen kasvihuonekaasujen päästöjä rajoitettiin mahdollisimman kokonaisedullisella tavalla. Malli laski samalla tapahtuvat muutokset muiden ilmansaasteiden päästöissä. Mallitarkastelut osoittivat, että kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamistoimenpiteillä voidaan saavuttaa myös merkittäviä sivuhyötyjä muiden ilmansaasteiden päästöjen vähentämisessä. Skenaarioissa, joissa kasvihuonekaasujen vähentämistavoite oli -20 % vuoteen 2030 mennessä, rikkipäästöjen rakenteellinen vähenemä oli 11–16 % ja typenoksidien rakenteellinen vähenemä oli 8–9 % verrattuna tilanteeseen vuonna 2030, jossa Suomi toteuttaa vain Kioton pöytäkirjan. Pienhiukkasten kokonaispäästöjen kehityksessä rajoitustoimet erityisesti pienlähteissä ovat oleellisempia kuin lisärajoitukset tai rakenteelliset muutokset suuren mittakaavan energiantuotannossa. Suurimmat tulosten epävarmuudet ovat hiukkaspäästöjen osalta pienlähteiden päästöjen keskimääräisessä nykytasossa ja tulevaisuuden kehityksessä.

Useimmat kasvihuonekaasujen päästöjä Suomessa vähentävät teknologiset ratkaisut alentavat myös muiden ilmansaasteiden päästöjä verrattuna nykytilanteeseen. Merkittävin toimi, joka vaatii lisäpanostusta poltto- ja puhdistusteknologiaan, on siirtyminen esim. suuren mittakaavan hiileen ja kaasuun pohjautuvasta sähkön- ja lämmöntuotannosta biomassan käyttöön, erityisesti jos käyttö tapahtuu pienemmissä yksiköissä. Pienen mittakaavan biopolttoaineiden vähäpäästöisen teknologian hyödyntämiseen panostaminen parantaa sekä mahdollisuuksia kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamiseen kotimaassa että suomalaisten laitevalmistajien mahdollisuuksia viennin lisäämiseen. Monissa Euroopan maissa biopolttoaineiden käytön lisääminen on eräs keskeisimmistä kaavailluista kasvihuonekaasujen päästöjen vähennystoimista. Lisäksi EU:n uudet

direktiivit ja ehdotukset asettavat kunnianhimoisia tavoitteita biopolttoaineiden osuuden lisäämiselle lähivuosina. EU-maiden laitemarkkinoille pääsy edellyttää korkeatasoista polttoteknologiaa.

Suomalaisen teknologian rooli voi viennin myötä olla huomattavasti merkittävämpi kuin sen rooli ainoastaan kotimarkkinoilla. Suomalainen osaaminen erityisesti kehittyneissä bioenergian hyödyntämistekniikoissa, yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa biopolttoaineilla sekä tuulienergiateknologiassa tarjoaa hyvät lähtökohdat globaalien markkinaosuuksien kasvattamiseen ilmastonmuutoksen torjunnan ja puhtaamman teknologian kysynnän luomilla markkinoilla. Ilmastomyönteisen teknologian on laajalti menestyäkseen kyettävä vähentämään myös muiden ilman epäpuhtauksien päästöjä.

Globaalisti kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämistoimet voivat aiheuttaa erittäin merkittäviä myönteisiä sivuvaikutuksia muiden ilmansaasteiden vähenemisenä ja siten paikallisen ja alueellisen ilmanlaadun paranemisena. Suurimmat suhteelliset hyödyt ovat odotettavissa kehittyvissä maissa, joissa käytössä olevaa vanhentunutta ja puutteellista tekniikkaa (esim. fossiilisia polttoaineita käyttäviä energiantuotanto- ja teollisuuslaitoksia ilman asianmukaista savukaasujen puhdistustekniikkaa) korvataan uudella, tehokkaammalla ja puhtaammalla teknologialla. Näitä ovat esimerkiksi korkean hyötysuhteen kaasu- tai biomassalaitokset ja muu uusiutuviin energianlähteisiin perustuva moderni teknologia. Suurimmat kansainvälisissä tutkimuksissa löydetty odotettavissa olevat sivuhyödyt tällaisista kasvihuonekaasujen vähennystoimista ovat olleet peräisin pienhiukkaspäästöjen vähenemisestä ja siten väestön terveyshaittojen pienenemisestä. Koska haitallisille ilmansaasteille altistumisen on arvioitu aiheuttavan vuosittain kehitysmaissa lähes kolme miljoonaa ennenaikaista kuolemaa sekä erittäin laajoja haitallisia terveysvaikutuksia, voivat globaaleilla ilmastotoimilla lähivuosikymmeninä saavutettavissa olevat konkreettiset sivuhyödyt väestön terveydelle olla erittäin merkittäviä. Paikallisesta näkökulmasta elinympäristön ja hengitysilmän puhdistuminen voi olla huomattavasti kasvihuonekaasujen vähenemistä merkittävämpi tekijä uuden teknologian kysynnässä ja käyttöönotossa.

Lähdeluettelo

Aasian kehityspankki. 1999. Urban sector strategy. Aasian kehityspankki, Manila, Filippiinit.

Amann, M., Bertok, I., Cofala, J., Gyarfas, F., Heyes, C., Klimont, Z., Makowski, M., Schöpp, W. & Syri, S. 1999. Cost-effective control of acidification and ground-level ozone, *Technical Reports to the European Commission*, DG-XI, IIASA, Laxenburg, Itävalta.

Barker, T. & Rosendahl, K. 2000. Ancillary benefits of GHG mitigation in Europe: SO₂, NO_x, and PM10 reductions from policies to meet Kyoto targets using the E3ME model and Externe evaluations. Paper presented at IPCC/OECD Workshop on assessing the ancillary benefits and costs of greenhouse gas mitigation strategies. 27.–29.3.2000, Washington DC, USA.

Cifuentes, L., Borja-Aburto, V., Gouveia, N., Thurston, G. & Davis, D. 2001a. Hidden health benefits of greenhouse gas mitigation. *Science* 293: 1257–1259.

Cifuentes, L., Borja-Aburto, V., Gouveia, N., Thurston, G. & Davis, D. 2001b. Assessing the health benefits of urban air pollution reductions associated with climate change mitigation (2000–2020): Santiago, São Paulo, México City and New York City. *Environmental Health Perspectives* 109: 419–425.

Cofala J. & Syri, S. 1998a. Sulphur emissions, abatement technologies and related costs for Europe in the RAINS model. IIASA Interim Report 98-035, IIASA, Laxenburg, Itävalta.

Cofala J. & Syri, S. 1998b. Nitrogen oxides emissions, abatement technologies and related costs for Europe in the RAINS model. IIASA Interim Report 98-088, IIASA, Laxenburg, Itävalta.

Davis, D., Kjeilstrom, T. and 10 others. 1997. Short-term improvements in public health from global climate policies on fossil-fuel combustion: an interim report. *Lancet* 350: 1341–49.

De Leo, G.A., Rizzi, L., Caizzi, A. & Gatto, M. 2001. The economic benefits of the Kyoto Protocol. *Nature* 413: 478–479.

ECN-RIVM. 2000. Synergy in the approach to climate change and acidification. Perspectives for energy and mobility in the Netherlands in 2030. Background report to

the fifth National Environmental Outlook Plan. ECN-RIVM report 00-003. Netherlands Energy Research Foundation, Petten, Hollanti.

EU. 1998. Directive 98/69/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EC. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 350, 28.12.1998, s. 1–56.

EU. 2000. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 332, 28.12.2000, s. 91–111.

EU. 2001a. Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 309, 27.11.2001, s. 22–30.

EU. 2001b. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions from certain pollutants into the air from large combustion plants. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 309, 27.11.2001, s. 1–20.

EU. 2001c. Directive 2001/77/EC of the European Parliament and the Council on the promotion of the electricity produced from renewable energy sources in the international electricity market. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 283, 27.10.2001, s. 33–40.

Euroopan komissio. 1997. COM (97)88, Communication to the Council and the European Parliament on a Community Strategy to Combat Acidification, Euroopan komission XI alaosasto, Bryssel, Belgia.

Euroopan komissio. 2000. The Auto-Oil II Programme. A report from the services of the European Commission. October 2000. Euroopan komissio, Bryssel, Belgia.

Fortum. 2002. Fortum yhteiskunnassa 2001. Fortum OY, Espoo.

Helynen, S. & Oravainen H. 2002. Polttopuun pientuotannon ja -käytön kehitystarpeet. Teknologiakatsaus 124/2002. TEKES, Helsinki.

Huotari, J., Vesterinen, R. 1995. Muut polton päästöt. Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. (toim.). Poltto ja palaminen. IFRF Suomen kansallinen osasto. Gummerus kirjapaino OY, Jyväskylä. S. 298–322. ISBN 951-666-448-2.

Hytönen, K., Nuutinen, J. & Raunemaa, T. 2002. Saunan lämmityksen hiukkaspäästöt. Mittaukset kesällä 2002. Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitoksen monistesarja 14/02. ISSN 0786-4728.

IEA. 2002a. CO₂ emissions from fuel combustion. OECD/IEA, Pariisi, Ranska. ISBN 92-64-09794-5.

IEA. 2002b. Beyond Kyoto. Energy dynamics and climate stabilisation. OECD/IEA, Pariisi, Ranska. ISBN 92-64-19838-5.

Ikonen, M., Nylund, N.-O., Aakko, P., Laurikko, J., Eklund, T. & Mäkelä, S. 2000. Katsaus ajoneuvoliikenteen polttoainevaihtoehtoihin. VTT Energian raportteja 18/2000. VTT, Espoo. ISSN 1457-3350.

IPCC, 2001. Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group 3 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jokiniemi, J. & Kauppinen, E. 1995. Polttoprosessien aerosolit. Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen & J., Hupa, M. (toim.). Poltto ja palaminen. IFRF Suomen kansallinen osasto. Gummerus kirjapaino OY, Jyväskylä. S. 174–209. ISBN 951-666-448-2.

Jokiniemi, J. 2002. Pers. comm.

Karvosenoja, N. 2001. Primary particulate emissions from stationary combustion processes in Finland. Finnish Environment Institute mimeograph 232, Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland. 32 s. ISBN 952-11-1006-6.

Lehtilä, A. & Pirilä, P. 1996. Reducing energy related emissions—Using an energy systems optimization model to support policy planning in Finland. *Energy Policy* 24 (9), 805–819.

Lehtilä, A. & Tuhkanen, S. 1999. Integrated cost-effectiveness analysis of greenhouse gas emission abatement. VTT Publications 374, Espoo, Finland.

Lehtilä, A., Tamminen, E., Mäkelä, J. & Pirilä, P. 2002. Development of energy Technology and Climate Change CLIMTECH 1999–2002. TEKES Technology Programme Report 14/2002. TEKES, Helsinki.

Lehtilä, A. & Syri, S. 2003. Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita. Climtech-ohjelman skenaariotarkastelu. VTT projektiraportteja.

Lükewille, A., Bertok, I., Amann, M., Cofala, J., Gyarfas, F., Heyes, C., Karvosenoja, N., Klimont, Z. & Schöpp, W. 2001. A framework to estimate the potential and costs for the control of fine particulate emissions in Europe. IIASA Interim Report IR-01-023, IIASA, Laxenburg, Itävalta.

Maailmanpankki. 2001. World Development indicators 2001. Maailmanpankki, Washington DC, USA.

Martin, B., Pasquereau, M., Dementhon, J., Giavazzi, F., Martini, G., Buttini, P., Mattiot, F., Aakko, P., Kotzias, D. & Larsen, B. 2000. Characterization of engine exhaust particulate fingerprints and their contribution to air quality–PARFIN. Final report for contract JOF3-CT97-0040. Groupement Europeen de Recherches Technologiques sur les Hydrocarbures, Ranska.

Mäkelä, K., Tuominen A. & Pääkkönen E. 2002. Suomen liikenteen päästöjen laskentajärjestelmä LIPASTO 2001. MOBILE raportti M2T9916-13. VTT tutkimusraportti RTE 3164/02. VTT, Espoo.

Nakićenović N. (ed.). 2000. Special Report on Emission Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Iso-Britannia.

Norbeck, J., Durbin, T. & Truex, T. 1998. Measurement of primary particulate matter emissions from light-duty motor vehicles. Final report for CRC Project No. E-24-2. Center for Environmental Research and Technology, University of California, Riverside, Yhdysvallat.

Nussbaumer, T. (ed.). 2001. Aerosols from biomass combustion. IEA Bioenergy Task 32: Biomass combustion and cofiring and the Swiss Federal Office of Energy: International Seminar, June 27th, Zürich, Sveitsi. ISBN 3-908705-00-2.

Ohlström, M. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa [The fine particle emissions of energy production in Finland] (in Finnish with English abstract). VTT Research Notes 1934, VTT, Espoo, Finland. 114 s. + liitt. 33 s. ISBN 951-38-5403-5.

Oinonen, T. & Soimakallio, S. 2001. HFC- ja PFC- yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa. VTT Tiedotteita 2099. Espoo. 154 s. + liitt. 17 s.

Oravainen, H. 2000. Testing methods and emission requirements for small boilers (<300 kW) in Europe. Motiva julkaisu B 3 / 2000. Motiva, Helsinki.

Outokumpu. 2002. Ympäristöraportti 2001. Outokumpu OY.

Rautaruukki Steel. 2002. Ympäristöraportti 2001. Rautaruukki Steel OY.

Streets D., Tsai N., Akimoto H. & Oka K. 2000. Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985-1997. *Atmospheric Environment* 34: 4413-4424.

Syri S., Amann M., Capros P., Mantzos L., Cofala J. & Klimont Z. 2001. Low-CO₂ energy pathways and regional air pollution in Europe. *Energy Policy* 29: 871-884.

Syri S., Karvosenoja N., Lehtilä A., Laurila T., Lindfors V. & Tuovinen J.-P. 2002. Modeling the impacts of the Finnish climate strategy on air pollution. *Atmospheric Environment* 36: 3059-3069.

Tervahattu H., Hongisto M., Kupiainen K., Aarnio P., Sillanpää M. & Saarikoski S. 2001. Syyskuun lämpöaalto toi paljon hiukkasia Virosta ja Venäjältä. Tutkimus hiukkasten koostumuksesta ja alkuperästä. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV, Helsinki.

Tilastokeskus. 2001. Energiatilastot 2000. Energia 2001:2. Tilastokeskus, Helsinki.

Tilastokeskus. 2002. Energiatilastot 2001. Energia 2002:2. Tilastokeskus, Helsinki.

Tuhkanen, S. 2002. Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. VTT Tiedotteita 2142. Espoo. 44 s.

UN/ECE. 1999. Protocol to the 1979 Convention on long-range transboundary air pollution to abate acidification, eutrophication and ground-level ozone. UN/ECE Document EB/AIR/1999/1. United Nations, New York, Geneva.

UNEP. 2002a. Ridding the world of POPs: a guide to the Stockholm Convention on persistent organic pollutants. UNEP Chemicals Division, Geneva, Sveitsi.

UNEP. 2002b. Global Environment Outlook 3. Past, present and future perspectives. UNEP, Nairobi, Kenia. ISBN 92-807-2087-2.

US EPA (United States Environmental Protection Agency). 2002. <http://www.epa.gov>.

Vestreng, V., Klein, H. 2002. Emission data reported to UN/ECE / EMEP: Quality assurance and trend analysis & presentation of WebDab. EMEP/MSW Note 1/2001. EMEP/MSW, Oslo, Norja.

VHK. 2002. Heat from renewable energy sources. The RES-H initiative and related directives. VHK report nr. 332, syyskuu 2002. VHK, Delft, Alankomaat.

WHO Regional Office for Europe, UN/ECE. 1999. Health risk of particulate matter from long-range transboundary air pollution. Preliminary assessment. WHO European Centre for Environment and Health, De Bilt, Alankomaat.



Tekijä(t) Syri, Sanna & Lehtilä, Antti			
Nimeke Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin			
Tiivistelmä <p>Työssä selvitettiin lyhyen ja pitkän aikavälin (noin vuoteen 2030) keskeisimpien kasvihuonekaasujen vähennystoimien merkittävät sivuvaikutukset muiden haitallisten aineiden ilmapäästöihin ja niiden aiheuttamiin ympäristöongelmiin. Työ tehtiin VTT Prosesseissa osana Tekesin CLIMTECH-teknologiaohjelmaa. Näkökulmina olivat suomalainen ja globaali. Työn Suomea koskevassa osassa käytettiin VTT:n EFOM-ENV-energiajärjestelmämallia arvioimaan, mitä muutoksia ilmansaasteiden päästöissä on odotettavissa kasvihuonekaasujen vähentämistoimenpiteiden myötä. Mallilla laskettiin erilaisia energiajärjestelmän kehityspolkuja, joissa Suomen kasvihuonekaasujen päästöjä rajoitettiin mahdollisimman kokonaistaloudellisella tavalla. Malli laski samalla tapahtuvat muutokset muiden ilmansaasteiden päästöissä. Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamistoimenpiteillä voidaan Suomessa saavuttaa myös merkittäviä sivuhyötyjä muiden ilmansaasteiden päästöjen vähentämisessä. Skenaarioissa, joissa kasvihuonekaasujen vähentämistavoite oli -20 % vuoteen 2030 mennessä, rikkipäästöjen rakenteellinen vähenemä oli 11–16 % ja typen oksidien rakenteellinen vähenemä oli 8–9 % verrattuna tilanteeseen, jossa Suomi toteuttaa vain Kioton pöytäkirjan. Pienhiukkasten kokonaispäästöjen kehityksessä rajoitustoimet erityisesti pienlähteissä ovat oleellisempia kuin lisärajoitukset tai rakenteelliset muutokset suuren mittakaavan energiantuotannossa. Suurimmat tulosten epävarmuudet ovat pienhiukkasten osalta pienlähteiden päästöjen keskimääräisessä nykytasossa ja tulevaisuuden kehityksessä. Globaalisti kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämistoimet voivat aiheuttaa erittäin merkittäviä myönteisiä sivuvaikutuksia muiden ilmansaasteiden vähenemisenä ja siten paikallisen ja alueellisen ilmanlaadun paranemisena.</p>			
Avainsanat air pollution, greenhouse gases, emissions reduction, environmental impacts, modelling, sulphur dioxide, nitrogen oxides, particulates, legislation, scenarios			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6139-2 (nid.) 951-38-6140-6 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinnumero C2SU00179	
Julkaisu-aika Huhtikuu 2003	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 69 s.	Hinta B
Projektin nimi Uuden energiateknologian markkinat ja kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutus muihin ympäristöongelmiin		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2186
VTT-TIED-2186

Author(s) Syri, Sanna & Lehtilä, Antti			
Title The Impacts of Climate Change Mitigation on Air Pollutant Emissions			
Abstract <p>This study examined the side effects of greenhouse gas control measures on the emissions of other harmful air pollutants. The work was done in the context of the Climtech Technology Programme of the National Technology Agency (Tekes). The viewpoints considered were both national scale in Finnish conditions, as well as European and global. The national scale study was done with the help of the energy system model EFOM-ENV available at VTT. Scenario studies extending to the year 2030, assuming various levels of greenhouse gas emission reductions, were performed with the EFOM model. The EFOM model was used to find the cost-optimal ways for achieving the specified greenhouse gas emission reductions, and the model calculated the simultaneous changes occurring in the emissions of other air pollutants. The model studies for the Finnish energy system indicated that significant ancillary benefits in air pollution reduction can be achieved. A -20% greenhouse gas cutback requirement by the year 2030 from the 1990 level yielded a simultaneous reduction of 11–16% in sulphur emissions and a 8–9% reduction in nitrogen oxides emissions, compared to a situation where Finland would fulfill the Kyoto protocol requirement of emission stabilisation at 1990 level. The largest uncertainties in the results lie in the average present level and the future reduction possibilities of fine particle emissions from small-scale combustion. Reduction measures of particulate emissions especially from small-scale combustion determine the future development of total national particulate emissions far more than structural changes in large-scale energy production, which already executes effective emission control. The results obtained for Finland are in accordance with corresponding studies from other regions indicating significant ancillary benefits in reduced air pollution.</p>			
Keywords air pollution, greenhouse gases, emissions reduction, environmental impacts, modelling, sulphur dioxide, nitrogen oxides, particulates, legislation, scenarios			
Activity unit VTT Processes, Tekniikantie 4 C, PO.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6139-2 (soft back ed.) 951-38-6140-6 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number C2SU00179	
Date April 2003	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 69 p.	Price B
Name of project Uuden energiateknologian markkinat ja kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutus muihin ympäristöongelmiin		Commissioned by The National Technology Agency (Tekes)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Ilmastonmuutoksen hidastamista pidetään tällä hetkellä yhtenä ihmiskunnan suurimmista haasteista. Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kasvun tehokas rajoittaminen vaatii kasvihuonekaasujen globaalien päästöjen rajoittamista murto-osaan nykyisestä.

Ilmastonmuutoksen hidastamiseen ja torjuntaan vaadittavat toimet edellyttävät erittäin suuria muutoksia energian tuotannon ja kulutuksen teknologioissa ja rakenteissa. Näillä toimilla voi olla myös hyvin merkittäviä vaikutuksia myös muiden haitallisten aineiden päästöihin ja siten laaja-alaisiin ympäristöongelmiin. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, millaisia vaikutuksia kasvihuonekaasujen rajoittamisella on muihin ilmansaasteongelmiin. Tutkimuksen Suomea koskeva osuudessa tehtiin vuoden 2030 asti ulottuvia skenaariotarkasteluja. Tutkimus tehtiin osana Tekesin CLIMTECH-teknologiaohjelmaa.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374
