

Antti Lehtilä & Sanna Syri

Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita

| Climtech-ohjelman skenaariotarkastelu



Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita Climtech-ohjelman skenaariotarkastelu

Antti Lehtilä & Sanna Syri

VTT Prosessit



ISBN 951-38-6151-1 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6152-X (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/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

Toimitus Maini Manninen

Otamedia Oy, Espoo 2003

Lehtilä, Antti & Syri, Sanna. Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita. Climech-ohjelman skenaariotarkastelu [Scenarios for the Finnish energy system and emissions. Study made for the CLIMTECH Programme]. Espoo 2003. Tiedotteita – Research Notes 2196. 62 s.

Avainsanat greenhouse gases, abatement, emissions reduction, cost-effectiveness, technology, CLIMTECH, Finland, energy production, energy supply systems, scenarios

Tiivistelmä

Raportissa esitellyn CLIMTECH-hankkeen tavoitteena oli selvittää teknologian potentiaalia ja kustannustehokkuutta Suomen kasviuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä (noin vuoteen 2030) erilaisissa päästöjen rajoitusskenaarioissa. Työ tehtiin VTT Prosesseissa osana Tekesin CLIMTECH-teknoologiaohjelmaa. Päästöjä vähentävän teknologian merkitystä arvioitiin työssä VTT:n laajalla energiajärjestelmämallilla EFOM, joka sisältää kattavasti kaikkien kuuden Kioton pöytäkirjaan sisältyvän kasviuonekaasun kotimaiset päästölähteet sekä päästöjä vähentävien teknisten vaihtoehtojen kuvauksen.

Työssä hahmoteltiin päästöjen rajoittamiseen liittyvän teknologian kehittymiselle kaksi varsin erilaista tulevaisuudenkuvaa. Tavanomaisen kehityksen skenaariossa oletettiin kansainvälisten ilmastonmuutoksen hillintään tähtäävien toimien etenevän hitaasti, jolloin päästöjä vähentävän teknologian kehittämiseen ei panosteta merkittävästi nykyistä enempää. Optimistisessa teknologian kehityksen skenaariossa puolestaan oletettiin ilmastonmuutoksen hillintätoimien vauhdittuvan merkittävästi ennen vuotta 2030. Tällöin päästöjä vähentävän teknologian kehittäminen nousee tärkeäksi ja teknologia kehittyy nopeasti sekä Suomessa että maailmanlaajuisesti. Työssä keskityttiin CLIMTECH-ohjelmassa käsiteltyihin teknologiaryhmiin, joten tarkastelun ulkopuolelle rajattiin mm. mahdollinen ydinvoiman lisärakentaminen vuoden 2010 jälkeen.

Tulosten mukaan aikainen panostaminen hyviin kehityskohteisiin kannattaa pitkällä tähtäimellä. Teknologian nopea kehittyminen ja käyttöönotto voi vähentää Suomen päästöjen rajoittamisen kustannuksia sadoilla miljoonilla euroilla vuodessa. Kustannussäästöjen lisäksi teknologisen osaamisen kärjessä pysyminen laajentaa samalla merkittävästi teknologiaa kehittävien yritysten vientimahdollisuuksia. Vuoden 2010 jälkeen Suomen kasviuonekaasujen päästöjen rajoittamisen kannalta keskeisimpiä teknologiaryhmiä ovat tulosten mukaan bioenergia- ja tuulivoimatekniikat. Näiden ohella päästöjä voidaan kuitenkin vähentää kustannustehokkaasti lukuisilla muillakin teknologisilla ratkaisuilla. Energian loppukäytön tehostamisessa, jätehuollossa, jäähdytysteknologiassa ja teollisuusprosessien yhteydessä on monia lupaavia teknisiä keinoja päästöjen vähentämiseksi. Teknologian kehittämisen ohella merkittäviä tuloksia voidaan kuitenkin saavuttaa myös uuden teknologian käyttöönottoa edistämällä. Tulosten mukaan teknologian kehityksellä on selviä kytkentöjä myös mahdollisen tulevan kasviuonekaasujen päästökaupan taseeseen.

Lehtilä, Antti & Syri, Sanna. Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita. Climech-ohjelman skenaariotarkastelu [Scenarios for the Finnish energy system and emissions. Study made for the CLIMTECH Programme]. Espoo 2003. Tiedotteita – Research Notes 2196. 62 p.

Keywords greenhouse gases, abatement, emissions reduction, cost-effectiveness, technology, CLIMTECH, Finland, energy production, energy supply systems, scenarios

Abstract

The report presents results from a scenario study made under the CLIMTECH Technology programme. The objective of the study was to assess the potential and cost-efficiency of various technology options in the abatement of greenhouse gas emissions in Finland. The prospects were studied in both the short term and the medium term up to the 2030s. Technology projections drawn from the results of a total of 27 CLIMTECH projects were used in the analysis. The assessment was based on the use of a large energy system model, which has an extensive coverage of the emission sources and reduction measures of all the six greenhouse gases included in the Kyoto protocol. The estimated impacts of climate change on the energy system were also taken into account in the analysis.

Two distinct future scenarios were constructed for the development of low-emission technologies. In the ‘conventional’ scenario it was assumed that international measures for climate change mitigation evolve slowly. As a result, the penetration of new energy technologies would depend highly on economic policy instruments, as there would be no direct market push for cleaner technologies. In the ‘optimistic’ scenario, on the other hand, climate change mitigation measures would be accelerated by the year 2030, and they would lead to rapid development and employment of cleaner technologies, both world-wide and in Finland. The main focus of the study was on those technologies that were investigated under the CLIMTECH Programme. Consequently, some important technology options, such as increased nuclear power, were excluded from the analysis.

Systematic investments in technology development were found to yield substantial benefits in the long term, by decreasing emission reduction costs and by facilitating more ambitious reduction targets. The cuts in emission reduction costs could be several hundred million euros per annum in the case of rapid deployment of new technology. In addition to direct cost savings, the prospects for increasing exports would be much higher for the Finnish technology industries by breaking into the forefront of advanced energy technology markets. Advanced biofuel production and utilisation technologies and off-shore wind power proved to have the largest cost-effective emission reduction potential in Finland by the 2030s. Nevertheless, there is a large number of other technology options that should not be overlooked, albeit having a small potential individually. The results also indicated a clear relationship between technological development and national emission trading patterns.

Alkusanat

Julkaisu 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. Raportissa esitellyn selvityksen tavoitteena oli arvioida Suomen koko energijärjestelmän ja sen ilmapäästöjen kehitystä lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä (noin vuoteen 2030) sekä keskeisimpien kasvihuonekaasupäästöjen vähennystoimien teknis-taloudellista potentiaalia erilaisissa päästöjen rajoitusskenaarioissa. Päästöjä vähentävän teknologian kustannustehokkuutta koskeva tietämys voi osoittautua arvokkaaksi ilmastonmuutoksen torjuntatoimien suunnittelussa, sillä puhtaampien teknologioiden kehitystyöhön ja käyttöönottoon panostamalla tekniikoiden kehitystä voidaan nopeuttaa ja niiden kustannuksia alentaa. Sekä teknologian kehitystyön että investointien valintoja voidaan tällaisten teknologiakartoitusten tulosten avulla pyrkiä ohjaamaan päästötavoitteiden ja suomalaisten hyvinvoinnin kannalta optimaalisiin teknologioihin ja ratkaisuihin. Työ tehtiin VTT Prosesseissa vuoden 2002 aikana.

Työn ohjausryhmänä toimi CLIMTECH-ohjelman koordinaatioryhmä, johon kuuluivat prof. Ilkka Savolainen, erikoistutkija Sanna Syri, ja tutkija Mikael Ohlström. Tekijät esittävät lämpimät kiitoksensa työhön saaduista kommenteista ja evästyksistä.

Tekijät esittävät lämpimät kiitoksensa myös seuraaville VTT Prosessien asiantuntijoille: johtava tutkija Eero Tamminen, tutkijat Juha Forsström, Hannele Holttinen, Mikko Hongisto, Tiina Koljonen, Suvi Monni, Esa Peltola, Hannu Pihala, Aulis Ranne, Kari Sipilä sekä Sampo Soimakallio. He ovat tarjonneet auliisti asiantuntemustaan eri teknologioiden mahdollisuuksista tätä selvitystä varten.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat	5
1. Johdanto	7
2. Suomen energiajärjestelmä kansainvälisessä vertailussa.....	8
3. Energiajärjestelmämalli	15
4. Tarkastellut skenaariot	17
4.1 Yleisiä skenaario-oletuksia.....	17
4.2 Teknologiakohtaiset skenaario-oletukset	21
5. Skenaariotarkastelujen tuloksia	26
5.1 Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys	26
5.2 Primaarienergiälähteiden hankinta	28
5.3 Sähköenergian hankinta ja kokonaiskulutus	31
5.4 Yhdyskuntien sähkön ja lämmön tuotanto	33
5.5 Teollisuuden energiantuotanto ja päästöt	35
5.6 Rakennusten lämmitys ja jäähdytys	37
5.7 Liikenteen energian käyttö	38
5.8 Energian käytön tehostuminen	40
5.9 Rikin- ja typenoksidipäästöjen sekä hiukkaspäästöjen kehitys	41
5.10 Päästöjen rajoittamisen kustannukset	44
6. Teknologian potentiaali ja kustannustehokkuus	46
7. Jatkotutkimustarpeen kohteita	52
8. Yhteenveto	57
Lähdeluettelo	59

1. Johdanto

Eri teollisuusmaat ovat kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämismahdollisuuksissa hyvin erilaisessa asemassa. Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että mitä vähemmän tähän mennessä päästöjä on vähennetty, sitä helpompaa ja edullisempaa niitä on rajoittaa. Maissa, joissa energiaa tuotetaan runsaasti vanhoilla hiilivoimalaitoksilla, päästöjen vähentäminen laitoksia uudistamalla ja siirtymällä esimerkiksi maakaasun käyttöön voi jo muutenkin olla taloudellisesti kannattavaa. Sen sijaan mitä nykyaikaisempaa energiantuotantotekniikkaa maassa jo on ja mitä enemmän hiilidioksidipäästöttömiä energialähteitä käytetään, sitä vaikeampaa on päästöjen vähentäminen.

Suomessa kulutetaan henkeä kohti noin 60 prosenttia enemmän energiaa kuin EU-maissa keskimäärin. Tämä johtuu etupäässä kylmästä ilmastosta, pitkistä kuljetusmatkoista sekä ennen kaikkea teollisuutemme rakenteesta. Suuri osa Suomen teollisuudesta on energiaintensiivistä ja vientipainotteista perusteollisuutta. Edellä mainituista sivistä myös henkeä kohti lasketut hiilidioksidipäästöt ovat EU:n keskiarvoa suuremmat.

Energiantuotannon hiilidioksidipäästöt suhteutettuna käytettyyn energiaan ovat kuitenkin Suomessa huomattavasti sekä EU:n että OECD:n keskiarvoa pienemmät. Tämä johtuu tehokkaasta energian käytöstä ja siitä, että merkittävä osa energiasta tuotetaan hiilidioksidipäästöjä aiheuttamattomilla tekniikoilla, kuten vesivoimalla, ydinvoimalla ja biomassalla. Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa Suomi on maailman huipulla yhdessä Tanskan ja Hollannin kanssa. Käytössä olevan energiateknologian hyvä nykytaso sekä päästöttömien energialähteiden suuri osuus tekevät päästöjen tulevat vähentämistavoitteet varsin haasteellisiksi.

Climtech-teknoologiaohjelmassa tehtiin skenaariotarkastelu, jossa pyrittiin arvioimaan energijärjestelmän mahdollisia tulevaisuuden kehityskulkuja Suomessa. Yhtenä keskeisenä lähtökohtana skenaarioissa oli koko maapallon ja samalla Suomen ilmaston tuntuva lämpeneminen kuluvan vuosisadan aikana. Skenaarioissa tarkastelu kuitenkin rajoitettiin nykyisestä noin 30 vuoden päähän ulottuvaan tulevaisuuteen. Päästöjen rajoittamiseen liittyvän teknologian kehityksestä tarkasteltiin kahta varsin erilaista tulevaisuudenkuvaa. Skenaarioiden tehtävänä oli paitsi arvioida tulevaisuutta, myös auttaa tunnistamaan niitä syitä, jotka vaikuttavat siihen, mitä teknologioita kannattaisi kehittää ja mitkä ovat riskitekijöitä yksittäisten teknologioiden tulevaisuuden mahdollisuuksissa.

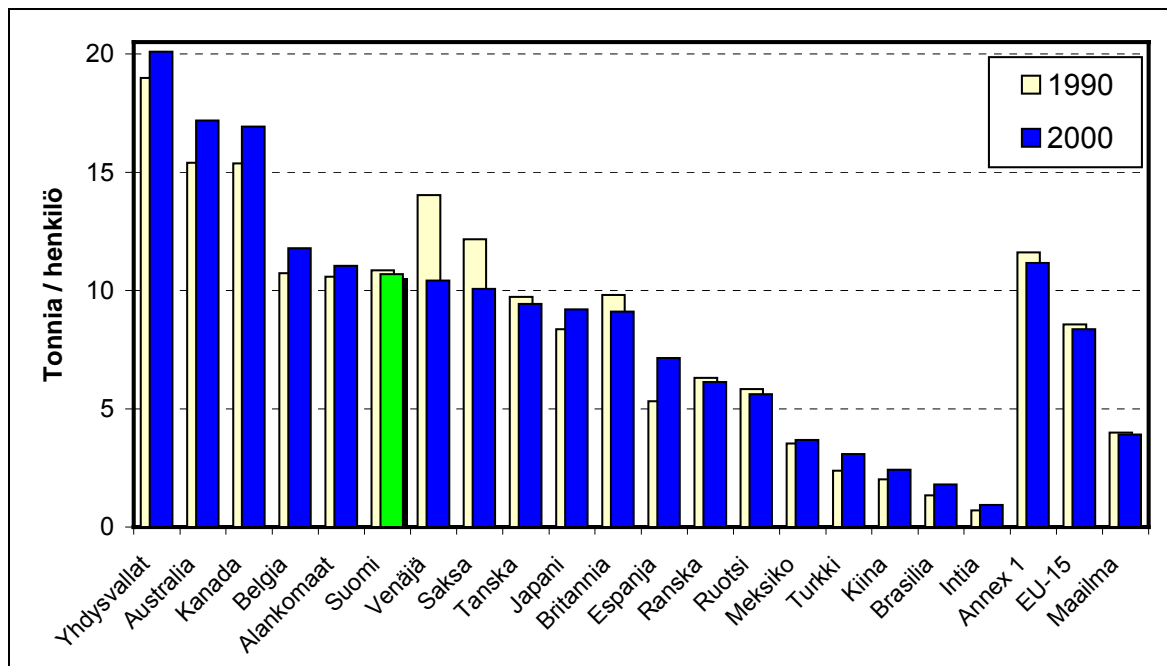
Tässä yhteenvetoraportissa esitetään skenaariotarkastelussa käytetyt keskeiset oletukset ja skenaariolaskelmista saadut tärkeimmät tulokset erityisesti päästöjä vähentävän teknologian kehittämisen ja käyttöönoton kannalta.

2. Suomen energiajärjestelmä kansainvälisessä vertailussa

Suomen energiajärjestelmään keskeisesti vaikuttavia tekijöitä ovat Suomen maantieteellinen sijainti ja sen kautta ilmasto, väkiluku suhteessa maa-alaan sekä väestön maantieteellinen jakauma, Suomen talouden ja erityisesti teollisuuden rakenne sekä luonnonvarat. Suomen kylmässä ilmastossa energiaa tarvitaan runsaasti rakennusten lämmitykseen. Pienen keskimääräisen väentihedyn sekä haja-asutuksen suuren osuuden vuoksi keskimääräiset kuljetusetäisyydet ovat verraten pitkiä, joten myös liikenteen hyötyenergian tarve on suurempi kuin tiheään asutuissa maissa. Nämä pääosin luonnonolosuhteista johtuvat tekijät ovat merkittäviä henkeä kohti laskettua energian kulutusta nostavia tekijöitä. Vielä tärkeämpi tekijä on kuitenkin talouden rakenne, joka on Suomessa poikkeuksellisen energiaintensiivinen laajan prosessiteollisuuden takia.

Monista energian kulutusta lisäävistä tekijöistä huolimatta energian tuotanto ja käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat Suomessa henkeä kohti laskettuna lähes teollisuusmaiden keskitasoa (Kuva 1). Suurimpia henkeä kohti lasketut päästöt ovat OECD-maista Yhdysvalloissa, Australiassa ja Kanadassa, ja pienimpiä mm. Ruotsissa ja Sveitsissä ja Unkarissa.

Muissa pohjoisilla leveysasteilla sijaitsevissa maissa, kuten Ruotsissa, Norjassa ja Kanadassa, ilmaston ja maantieteellisten olosuhteiden vaikutus on samankaltainen kuin

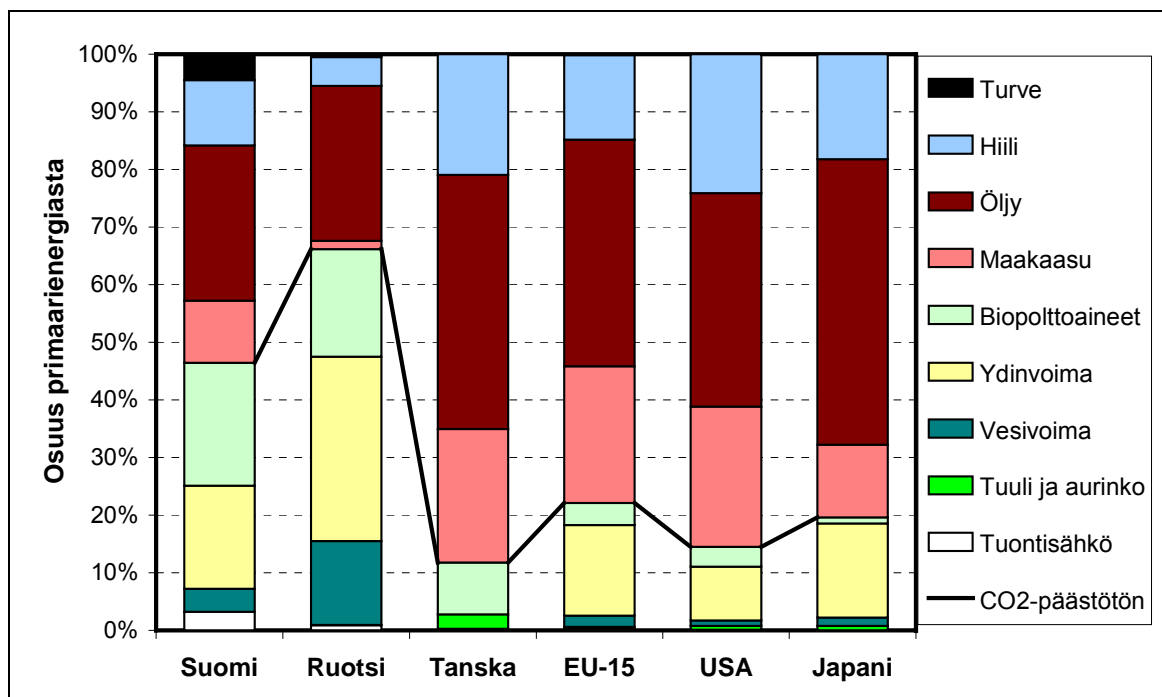


Kuva 1. Energiaperäisten hiilidioksidipäästöjen määrä henkeä kohti eräissä maissa vuosina 1990 ja 2000. (IEA 2002c).

Suomessa. Myös kansantuotteen taso sekä energiaintensiivisten toimialojen osuus on näissä maissa verrattain samanlainen. Verrattaessa esimerkiksi pohjoisilla leveysasteilla sijaitsevien maiden päästöjä on kuitenkin otettava huomioon myös erot maiden energia-varoissa. Suomessa vesivoimavarat ovat paljon pienemmät kuin Ruotsissa, Norjassa ja Kanadassa, mutta Suomessa on toisaalta huomattavat polttoaineeksi sopivan turpeen varannot. Energiavarat heijastuvat suoraan eri maiden primaarienergian kokonais-kulutuksen rakenteeseen, jota on eräiden maiden osalta havainnollistettu kuvassa 2.

Vielä 1960-luvun alussa primaarienergiayksikköä kohti lasketut energiaperäiset hiilidioksidipäästöt olivat Suomessa hyvin pienet, sillä vesivoima ja puuenergia kattoivat suuren osan kokonaisenergian tarpeesta. Sen jälkeen ominaispäästöt nousivat tasaisesti 1970-luvun loppuun saakka noin 60 gCO₂/MJ tasolle. Ydinvoiman käyttöö-otto laski ominaispäästöt 1980-luvun alkupuolella takaisin alle 50 gCO₂/MJ:n, ja sen jälkeenkin päästöt ovat pysyneet tuon rajan alapuolella.

Kolmenkymmenen viime vuoden aikana energiankäytön hiilidioksidin ominaispäästöt ovat olleet Suomessa jatkuvasti 10–25 % EU:n keskiarvoa pienemmät, mikä johtuu suurelta osin siitä, että bioenergian osuutta Suomen energiahuollossa on kyetty 15 viime vuoden aikana merkittävästi lisäämään. Päästöttömien energialähteiden osuus onkin Suomen energian kokonaiskulutuksesta nykyisin lähes puolet eli yli kaksinkertainen EU:n keskiarvoon verrattuna.

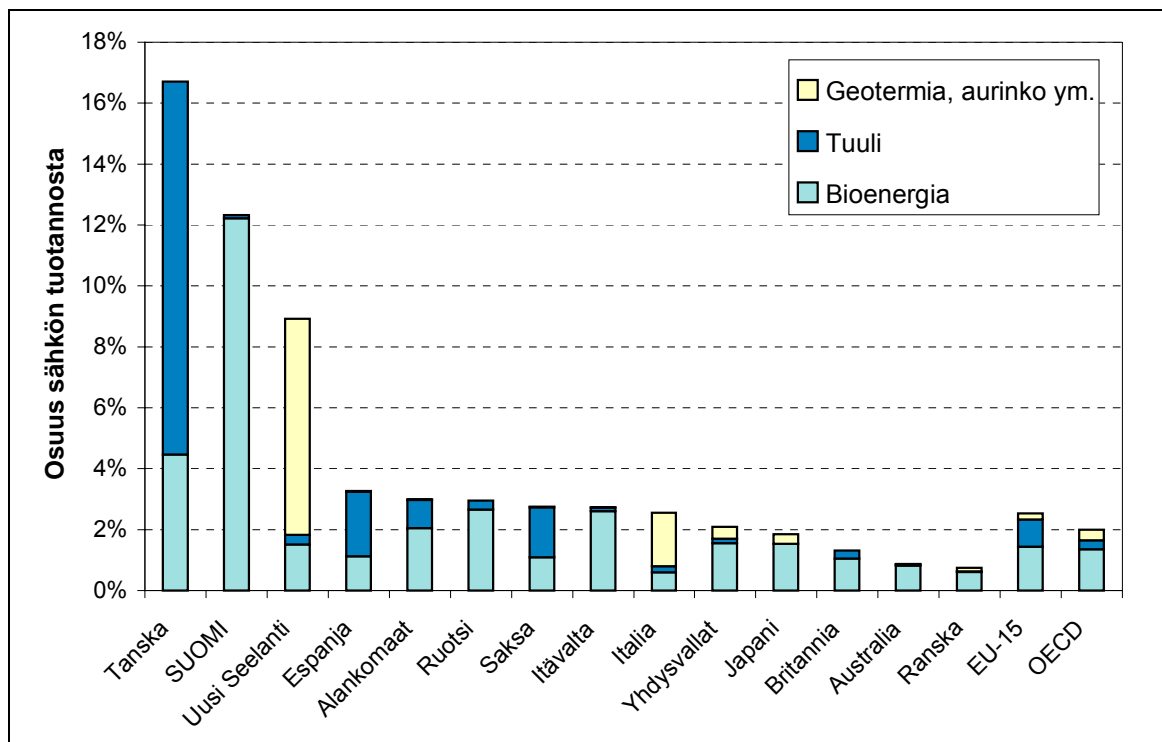


Kuva 2. Primaarienergian kokonaiskulutuksen rakenne energialähteittäin eräissä maissa vuonna 2000 (IEA 2002a).

Uusiutuvien energialähteiden osuutta energian kokonaiskäytöstä pyritään nykyisin aktiivisesti lisäämään kaikissa teollisuusmaissa. EU on asettanut yhteiseksi tavoitteekseen osuuden nostamisen vuoteen 2010 mennessä 12 %:iin primaarienergian kokonaiskulutuksesta ja 22 %:iin sähkön kokonaishankinnasta. Vuonna 2000 uusiutuvien energialähteiden osuus oli EU:ssa vain noin 6 % primaarienergiasta ja 14 % sähkön tuotannosta (EEA 2002).

Suomi ylittää jo nykyisin selvästi EU:n keskimääräiset tavoitteet vuodelle 2010. Uusiutuvan energian osuus oli vuonna 2000 noin 25 % primaarienergiasta ja 30 % sähkön kokonaishankinnasta. Kun tarkastellaan muuta kuin vesivoimavaroihin perustuvaa uusiutuvilla energialähteillä tuotettua sähköä, Suomi on jopa monin verroin EU:n keskitason yläpuolella (Kuva 3). Jokaiselle EU-maalle on kuitenkin asetettu myös omat maakohtaiset uusiutuvan sähköntuotannon lisäystavoitteet, jotta joka maassa tavoite olisi suunnilleen yhtä tiukka. Suomen tavoitteeksi on asetettu 31,5 % vuonna 2010, mikä vastaa suunnilleen uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman mukaista tavoitetta (Helynen et al. 1999). Vaikka tavoite saattaa näyttää lievältä, sähkön kulutuksen tuntuva kasvu vuoteen 2010 mennessä voi tehdä sen vielä varsin vaativaksi.

Vuosina 1990–2000 muiden uusiutuvien energialähteiden kuin vesivoiman käyttö kasvoi EU:ssa IEA:n tilastojen mukaan peräti noin viisinkertaiseksi. Voimakkainta kasvu on ollut tuulivoiman tuotannossa, jonka määrä kasvoi suunnilleen 30-kertaiseksi

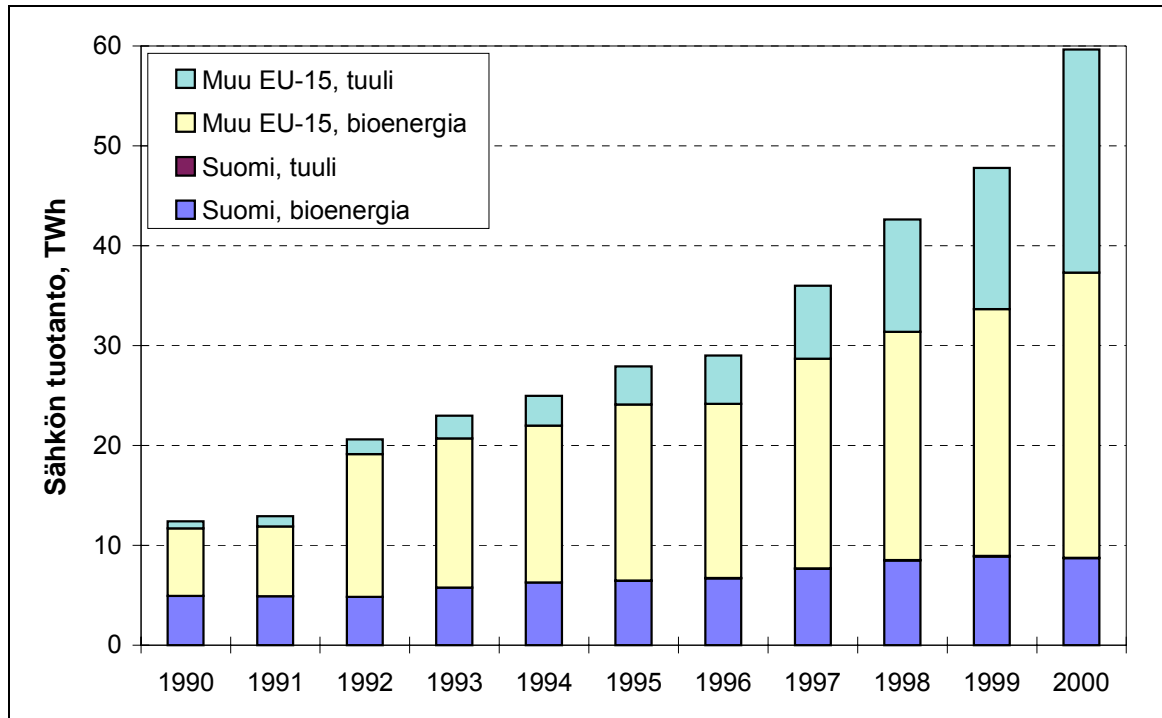


Kuva 3. Uusiutuvien energialähteiden (ilman vesivoimaa) osuus sähkön kokonaistuotannosta eräissä maissa vuonna 2000 (IEA 2002b).

kymmenessä vuodessa. Vuosina 2001–2002 EU:n tuulivoimakapasiteetti kasvoi edelleen hyvää vauhtia, noin 70 % kahdessa vuodessa. On kuitenkin huomattava, että myös bioenergiapohjaista sähköntuotantoa on jo kyetty lisäämään EU:ssa voimakkaasti. Sen määrä kasvoi yli kolminkertaiseksi vuosina 1990–2000 (Kuva 4).

Suomessa tuulivoimatuotannon keskimääräinen kasvuvauhti oli 1990-luvulla samaa luokkaa kuin EU:ssa keskimäärin, mutta alhaisen lähtötason vuoksi Suomen saavutus näyttää kansainvälisessä vertailussa melko vaatimattomalta. Bioenergiesähkön tuotanto puolestaan suunnilleen kaksinkertaistui, mitä on pidettävä erittäin hyvänä saavutuksena bioenergian osuuden korkean lähtötason vuoksi. Koska bioenergian käyttöä koskevat kansainväliset tilastot olivat vielä 1990-luvun alussa puutteellisia, Suomi on itse asiassa saattanut pysyä myös biosähkön tuotannon lisäämisessä melkein samassa tahdissa kuin EU keskimäärin. Tulevaisuudessa bioenergialla tuotetun sähkön lisääminen Suomessa samassa määrin kuin muualla EU:ssa lienee jo mahdotonta, mutta tuulivoiman tapauksessa kotimarkkinoiden suhteellinen kasvupotentiaali on vielä hyvin suuri.

Sähkön tuotanto on energian tuotannon hiilidioksidipäästöjä rajoitettaessa useissa maissa hyvin keskeisessä asemassa. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että kansantalouden kannalta keskeiset toiminnot kuluttavat runsaasti sähköä, jonka tulisi olla talouden kilpailukyyn turvaamisen vuoksi verrattain edullista. Sähkön kulutus lisäksi kasvaa

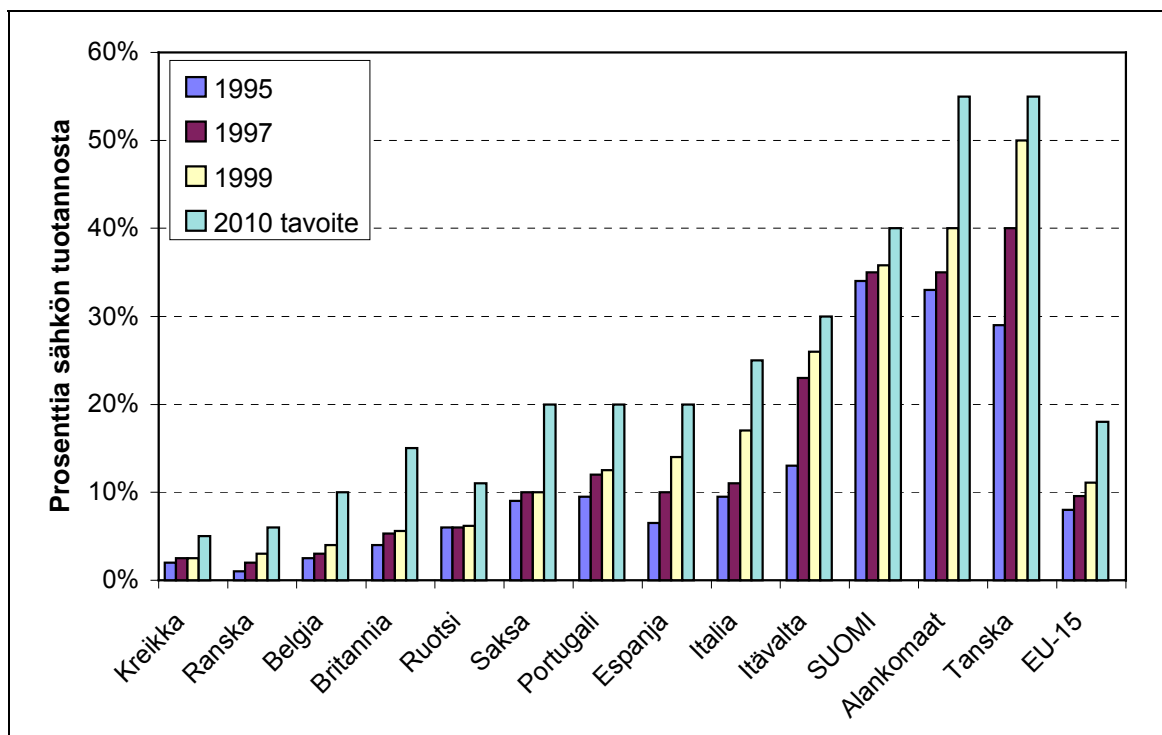


Kuva 4. Bioenergialla ja tuulivoimalla tuotetun sähköenergian määrän kehitys Suomessa ja EU-maissa vuosina 1990–2000 (IEA 2002b). Suomen tuulienergiatuotannon määrä ei vähäisyytensä vuoksi juuri erotu kuvassa.

talouden kasvun myötä yleensä selvästi enemmän kuin energian kokonaiskulutus. Kun uusiutuvat energialähteet ovat joko rajallisia (vesivoima ja bioenergia) tai niiden hyödyntäminen on huomattavasti fossiilisia polttoaineita kalliimpaa, merkitsee talouden kasvu painetta fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan sähkön tuotannon ja siten hiilidioksidipäästöjen lisäämiseen. Sähkön tuotannon päästöjä voidaan vähentää toisaalta vähentämällä polttoaineisiin perustuvaa sähkön tuotantoa ja toisaalta parantamalla sen tuotannon hyötysuhdetta.

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on tehokas keino vähentää sähkön tuotantoon tarvittavien polttoaineiden määrää. Se edellyttää kuitenkin luonnollisesti sitä, että tuotettu lämpö voidaan hyödyntää joko rakennusten lämmitykseen tai teollisuuden tuotantoprosesseissa. Suomessa yhteistuotannolla on pitkät perinteet sekä prosessi-teollisuudessa että kaukolämmön tuotannossa. Nykyisin yhteistuotannon osuus koko sähkön tuotannosta on Suomessa noin 35 %, ja se on kansainvälisten tilastojen mukaan kolmanneksi suurin EU-maiden joukossa (Kuva 5). Suomea suuremmaksi osuus on tilastoitu ainoastaan Tanskassa ja Hollannissa. Koko EU:n piirissä yhteistuotannon keskimääräinen osuus on vain noin 11 %.

Hajautettuun energiantuotantoon voidaan laskea mukaan sähkön ja lämmön yhteistuotanto, pienvesivoima sekä tuuli- ja aurinkosähkön tuotanto (Wade 2002). Vuonna 2002 valmistuneen kansainvälisen kartoituksen mukaan Suomi on yhteis-



Kuva 5. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon kehitys EU-maissa 1990-luvulla ja tavoite vuodelle 2010 (Cogen 2001, Tilastokeskus 2002).

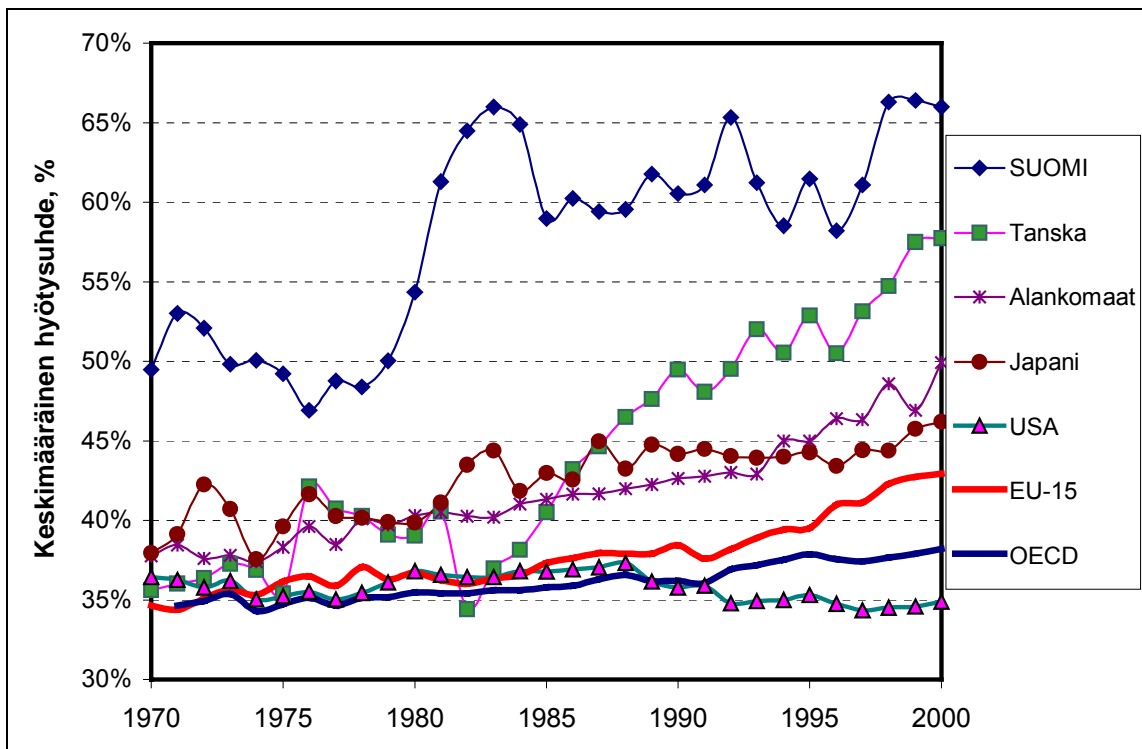
tuotannon suuren osuuden ansiosta myös hajautetussa energiantuotannossa maailman johtavia maita. Kärjessä ovat yhteistuotantotilastojen tapaan Tanska, Hollanti ja Suomi, mutta varsin lähelle näitä nousee kartoituksen mukaan Venäjä noin 30 %:n osuudella sähkön kokonaistuotannosta. Myös muissa itäisen Euroopan maissa yhteistuotannon merkitys on ollut perinteisesti varsin suuri, mutta näissä maissa tuotannon tehokkuus on epäilemättä toistaiseksi nykyisiä EU-maita selvästi heikompi. Kiinassa hajautetun tuotannon osuus on kartoituksen mukaan noin 10 %, Yhdysvalloissa noin 8 % ja Japanissa noin 3 % (Wade 2002).

Uusiutuvien energialähteiden käytön tapaan EU pyrkii lisäämään myös sähkön ja lämmön yhteistuotannon osuutta jäsenmaiden sähkön tuotannosta. Tavoitteeksi on asetettu keskimäärin 18 %:n osuus vuoteen 2010 mennessä (EEA 2002). Eri maiden virallisia tavoitteita ei ole asetettu, mutta kuvassa 5 on esitetty Cogen Europe -järjestön näkemys eri maiden tavoitteista, joilla Unionin laajuinen tavoite toteutuisi.

Mikäli uusi viides ydinvoimalaitos tulee käyttöön suunnitelmien mukaisesti, näyttää yhteistuotannon osuuden merkittävä lisääminen Suomessa vaikealta. Noin 40 %:n taso voidaan ilmeisesti saavuttaa vuoteen 2010 mennessä, mutta 50 %:n osuus on tuskin realistinen vuoteen 2030 mennessä. Tämä johtuu muiden edullisten ja vähäpäästöisten sähköntuotantomuotojen suuresta yhteisestä osuudesta (vesivoima, ydinvoima ja voimakkaasti kasvava tuulivoima).

Yhteistuotannon osuus vaikuttaa merkittävästi tavanomaisiin polttoaineisiin perustuvan sähkön tuotannon energiatehokkuuteen ja siten sen polttoaineperäisiin päästöihin. Kuvassa 6 on esitetty tällaisen sähkön tuotannon keskimääräisen bruttohyötysuhteen kehitys eräissä maissa vuosina 1970–2000 IEA:n tilastojen mukaan (IEA 2002a). Yhteistuotannon merkitys näkyy näissä tilastoissa hyvin selvästi, sillä juuri Suomessa, Hollannissa ja Tanskassa sähkön tuotannon hyötysuhde on noussut huomattavasti EU-tai OECD-maiden keskiarvoa korkeammaksi.

Kuvassa esitetyt sähkön tuotannon hyötysuhteet on yhteistuotannon osalta laskettu energialähteittäin suoraan ns. energiaperiaatteella silloin, kun tuotannon kokonaishyötysuhde on tilaston mukaan ollut yli 80 %. Näin korkea energiahyötysuhde ei olisi mahdollinen, jos yhteistuotannoksi olisi tilastoitu merkittävä määrä tosiasiallista lauhdevoiman tuotantoa. Mikäli kokonaishyötysuhde on kuitenkin ollut tilastojen mukaan alle 80 %, yhteistuotannon polttoaineista on vähennetty myyntiin tuotetun lämmön tuotantoon kulunut polttoainemäärä olettaen lämmön tuotannon hyötysuhteeksi edellä mainittu 80 %. Vähennyksen jälkeen jäljelle jäävä polttoainemäärä on tämän jälkeen kohdistettu kokonaisuudessaan sähkön tuotantoon. Myös voimalaitosten omaan käyttöön tuotetun lämmön polttoaineet kohdistuvat tällöin sähkön tuotantoon.



Kuva 6. Tavanomaisiin polttoaineisiin perustuvan sähkötuotannon keskimääräinen energiahyötysuhde eräissä maissa (IEA 2002a, Tilastokeskus 2002).

Tällä oikeasevalla laskentamenettelyllä voidaan suurimmaksi osaksi poistaa vääristymät, jotka aiheutuvat mahdollisesta lauhdevoiman tuotannon tilastoinnista yhteistuotannoksi. Suurinta epäilyä ovat Suomessa perinteisesti herättäneet Tanskan yhteistuotantoa koskevat tilastot. Oikaistun laskennallisen sähkötuotannon hyötysuhteen valossa myös todellinen keskimääräinen hyötysuhde näyttää kuitenkin Tanskassa nousseen viime vuosien aikana varsin korkeaksi.

Suomessa samalla menettelyllä laskettu polttoaineisiin perustuvan sähkötuotannon keskimääräinen hyötysuhde on nykyisin yli 65 %, mutta se voi vaihdella melkoisesti vuodesta toiseen sen mukaan, kuinka paljon tavanomaista lauhdevoimaa on jouduttu tuottamaan yhteistuotantosähkön lisäksi. Ruotsissa keskimääräinen hyötysuhde on ollut vielä Suomeakin korkeampi, sillä siellä ei ole juuri ilmennyt tarvetta tavanomaisen lauhdevoiman tuotantoon.

3. Energiajärjestelmämalli

Energian tuotannon ja käytön hiilidioksidipäästöt muodostavat pääosan Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen kokonaismäärästä. Tulevaisuudessa tarvittavaa energian tuotantoa arvioitaessa peruslähtökohtana on energiapalvelujen eli niin sanotun hyötyenergian kysynnän arvioitu kehitys kansantalouden eri sektoreilla. Esimerkiksi teollisuuden hyötyenergian tarpeen kehitysarvioiden perustana voidaan käyttää arvioituja muutoksia eri teollisuuden sektoreiden tuotannossa. Lisäksi on luonnollisesti otettava huomioon, kuinka eri alojen tuoterakenteen ja tuotantoprosessien ennakoitaan muuttuvan.

Tarkasteltavissa tulevaisuusskenaarioissa hyötyenergian kysynnän kehitys eri sektoreilla on arvioitu ottaen huomioon kansantalouden yksityiskohtaiset kehitysarviot ja energian moninaiset käyttökohteet. Hyötyenergian tarpeesta on tämän jälkeen johdettu arviot eri energialähteiden käytöstä sekä päästöjen kehityksestä käyttäen hyväksi laajaa energiajärjestelmän mallia. Malli sisältää monia rinnakkaisia ja vaihtoehtoisia energian tuotanto- ja käyttötekniikoita, joille on laadittu tekniikkakohtaiset arviot niiden teknistaloudellisen suorituskyvyn kehityksestä.

Skenaariotarkastelussa käytetty energiajärjestelmämalli on alun perin EU:n piirissä 1980-luvulla kehitetty EFOM-malli, joka on tyypiltään ns. osittaistasapainomalli. Osittaistasapainomalleissa hyötyenergian kysyntä kuvataan kiinteinä skenaarioina, joihin voidaan tarvittaessa liittää kysynnän hintajoustot. Kansantalouden eri sektoreiden välisten kytkentöjen ja kokonaistaloudellisten vaikutusten analysointiin tällainen malli ei sellaisenaan sovellu. Sen sijaan tämäntyyppisissä malleissa kuvataan yksityiskohtaisesti eri sektoreilla nykyisin ja tulevaisuudessa käytettävissä oleva energia-tekniologia sekä myös keskeisissä teollisuusprosesseissa käytettävä tekniologia, mikäli ne ovat merkityksellisiä energian kulutuksen tai päästöjen kannalta.

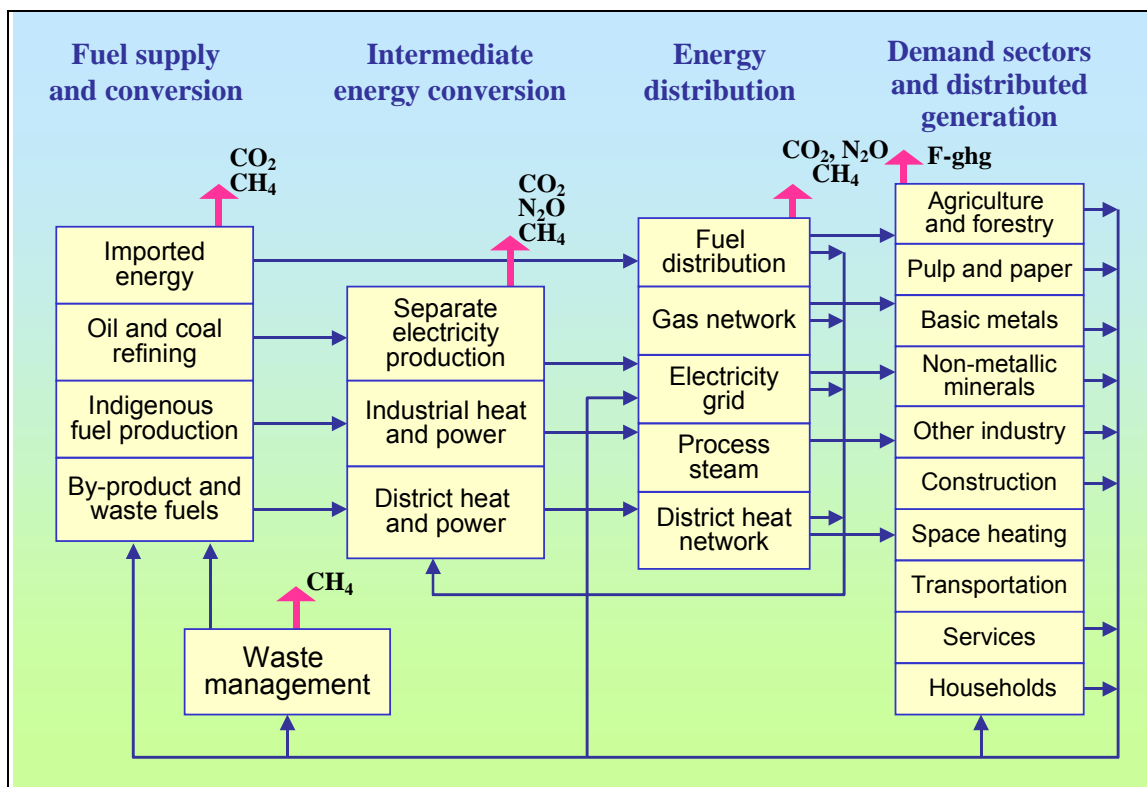
Teknologian rooli on mallissa kaikkiaan hyvin keskeinen, sillä malli valitsee eri sektoreilla tulevaisuudessa käyttöön otettavat energian tuotanto- ja käyttötekniikat niiden keskinäisen kilpailukyvyn perusteella. Jotta mallilla voitaisiin ottaa huomioon myös muut kuin energiaan liittyvät kasvihuonekaasujen päästöt, malli sisältää myös kaikkien muiden tärkeimpien päästölähteiden sekä niihin liittyvien päästöjä vähentävien teknisten ratkaisujen kuvauksen.

Teknologiavaihtoehtojen seulominen tehdään mallissa optimoinnin avulla. Energiajärjestelmän tulevalle kehitykselle etsitään kustannukset minimoiva least-cost-ratkaisu, joka toteuttaa energiajärjestelmän kehitykselle asetetut reunaehdot. Kehitykselle asetettavat rajoitukset voivat koskea esim. energian tuotannon ja käytön päästöjä, tuotantokapasiteettien muutoksia, eri polttoaineiden kulutuksen enimmäismääriä tai vaadittavaa infrastruktuuria. Malli on luonteeltaan dynaaminen, sillä mallin avulla voidaan tarkastella energiajärjestelmän ajallisia muutoksia jaksoittain 20–50 vuoden

aikana. VTT:n EFOM-mallia käytettiin laajasti hyväksi mm. kansallisen ilmastostrategian taloudellisia vaikutuksia koskevissa taustalaskelmissa (Kemppi et al. 2001).

Koko energiajärjestelmän käsittävää mallia varten tarvitaan hyvin laaja energian tuotantoa, kulutusta ja päästöjä koskeva teknis-taloudellinen tietokanta. Tarkastelussa käytetty Suomen energiajärjestelmän malli käsittää lähes 20 000 muuttujaa ja saman verran yhtälöitä. Mallin perusrakennetta on havainnollistettu kuvassa 7, joka esittää malliin sisältyvien sektorikohtaisten osamallien välisiä kytkentöjä. Yksityiskohtaisimmin mallissa on kuvattu sähkön ja lämmön tuotantoteknologiat, metsäteollisuus, metallin perusteellisuus ja kiinteistöjen lämmitys, mutta myös esim. liikenteen ja jätehuollon kuvaukset ovat varsin monipuolisia.

Varta vasten Climtech-ohjelman skenaariotarkasteluja varten sektorikohtaisista osamalleista uudistettiin perusteellisesti liikenteen, jätehuollon ja maatalouden kuvaus. Liikenteen sektorilla malliin lisättiin joukko uusia ajoneuvoteknologiavaihtoehtoja sekä päivitettiin kaikki eri liikennemuotojen päästökertoimet. Jätehuollon mallissa metaanipäästöjen laskenta muutettiin dynaamisen menetelmän mukaiseksi kuten vuonna 2002 tehdyssä kansallisessa kasvihuonekaasujen inventaarissa. Muutos on Suomen kokonaispäästöjen laskennan kannalta merkittävä, ja se aiheuttaa melko tuntuvaan päästöjen lisävähennystarpeen Kioton pöytäkirjan mukaisen tavoitteen saavuttamiseksi.



Kuva 7. VTT:n EFOM-energiajärjestelmämallin yleisrakenne.

4. Tarkastellut skenaariot

4.1 Yleisiä skenaario-oletuksia

Climtech-ohjelman tavoitteena oli edistää ilmastonmuutoksen hillintää sekä kansallisten ja kansainvälisten päästörajoitustavoitteiden saavuttamista tukemalla ilmastonmuutosta rajoittavan teknologian valintoja, tutkimusta, kehitystä, kaupallistamista ja käyttöönottoa. Ohjelmasta saatavan kokonaiskuvan tueksi eri teknologiaselvitysten tuloksia hyödynnettiin Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen tulevaisuuden kehityksen kokonaistarkasteluun. Skenaariotarkasteluissa pyrittiin arvioimaan, mikä teknologian kehittämisen ja käyttöönoton edistämisen rooli voisi olla päästörajoitustavoitteiden saavuttamisessa ja päästöjen vähennyskustannusten alentamisessa.

Kioton pöytäkirjan jälkeen todennäköisesti tulossa olevia entistä tiukempia kasvihuonekaasupäästöjen rajoitustavoitteita tarkasteltiin kahdessa vaihtoehtoisessa globaalissa kehityksen tulevaisuudenkuvassa. Kehitysarvioiden keskeisimpänä erona oli oletus teknologian kehityksen nopeudesta. Toisessa oletettiin teknologian kehittyvän 'tavanomaisella' vauhdilla, kun taas toisessa teknologian kehitys arvioitiin optimistisesti verraten nopeaksi. Näiden kahden peruskehitysarvion mukaisia skenaarioita tarkasteltiin lisäksi usealla erisuuruisella päästöjen vähennystavoitteella. Havainnollisuuden vuoksi niiden rinnalla tarkasteltiin myös yhtä pelkästään Kioton pöytäkirjan mukaiseen päästötavoitteeseen perustuvaa skenaariota, jossa teknologia kehittyy tavanomaiseen tahtiin. Päästöjen vähentämisen kustannusten vertailukohtana käytettiin ns. perusuraskenaariota, jossa ei oletettu lainkaan kasvihuonekaasujen päästöjen rajoitustoimia.

Tarkasteltujen skenaarioiden keskeisimmät oletukset olivat kaikkiaan seuraavat:

A. Skenaariot, joilla analysoidaan teknologian kustannustehokkuutta Kioton pöytäkirjan jälkeisten tiukentuvien päästötavoitteiden kannalta

- Nykyinen energiaverotus poistetaan vuoden 2010 jälkeen vähitellen ja siirrytään kasvihuonekaasujen päästöverotukseen.
- Kasvihuonekaasujen päästöjen kokonaismäärä on rajoitettava 20 % vuoden 1990 päästöjä pienemmäksi vuoteen 2030 mennessä. Vaihtoehtoina käsitellään lisäksi 10 ja 30 prosentin rajoitustavoitteita.

A1. Tavanomainen teknologinen kehitys

- Ilmastonmuutoksen hillintätoimet etenevät hitaahkosti.
- Päästöjä vähentävää teknologiaa ei kehitetä merkittävästi nykyistä enempää.
- Puhtaampia teknologioita otetaan Suomessa käyttöön melko hitaasti.

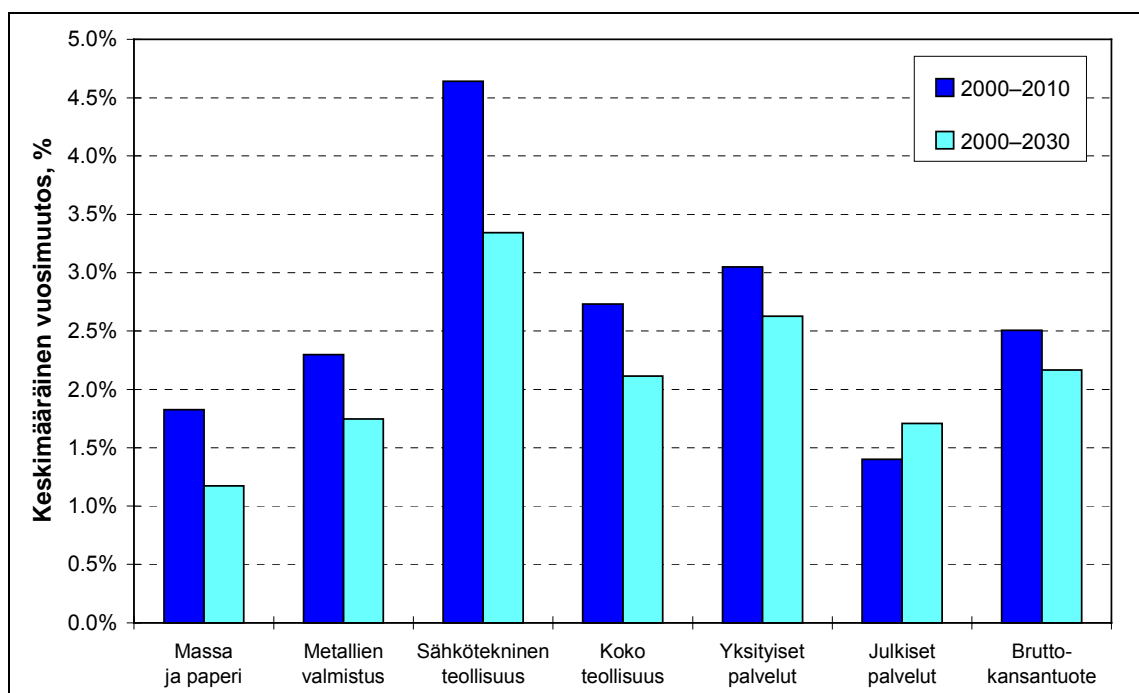
- Suomalaisen teknologian vientimahdollisuudet eivät juuri parane nykyisestä.

A2. Optimistinen teknologinen kehitys

- Ilmastonmuutoksen hillintätoimet vauhdittuvat jo paljon ennen vuotta 2030.
- Päästöjä vähentävän teknologian kehittämistä pidetään tärkeänä kaikkialla ja teknologiaa kehitetään.
- Teknologioiden suoritus- ja kilpailukyky kehittyvät nopeasti.
- Globaalit puhtaamman teknologian markkinat ja vientimahdollisuudet kasvavat nopeasti.
- Suomessa otetaan yhä enemmän käyttöön puhtaampaa teknologiaa.
- Suomesta tulee globaalisti merkittävä puhtaan teknologian toimittaja.

B. Kioton status quo -skenaario

- Suomessa käytetään nykyistä energiaverotusta ja tukimuotoja vuoteen 2030 saakka, veroja korotetaan Kioton päästötavoitteen saavuttamiseksi.
- Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ei synny Kioton pöytäkirjan jälkeen uusia sopimuksia, jotka asettaisivat sitovia päästötavoitteita vuoteen 2030 mennessä.
- Päästöjä vähentävää teknologiaa ei kehitetä maailmassa merkittävästi nykyistä enempää.

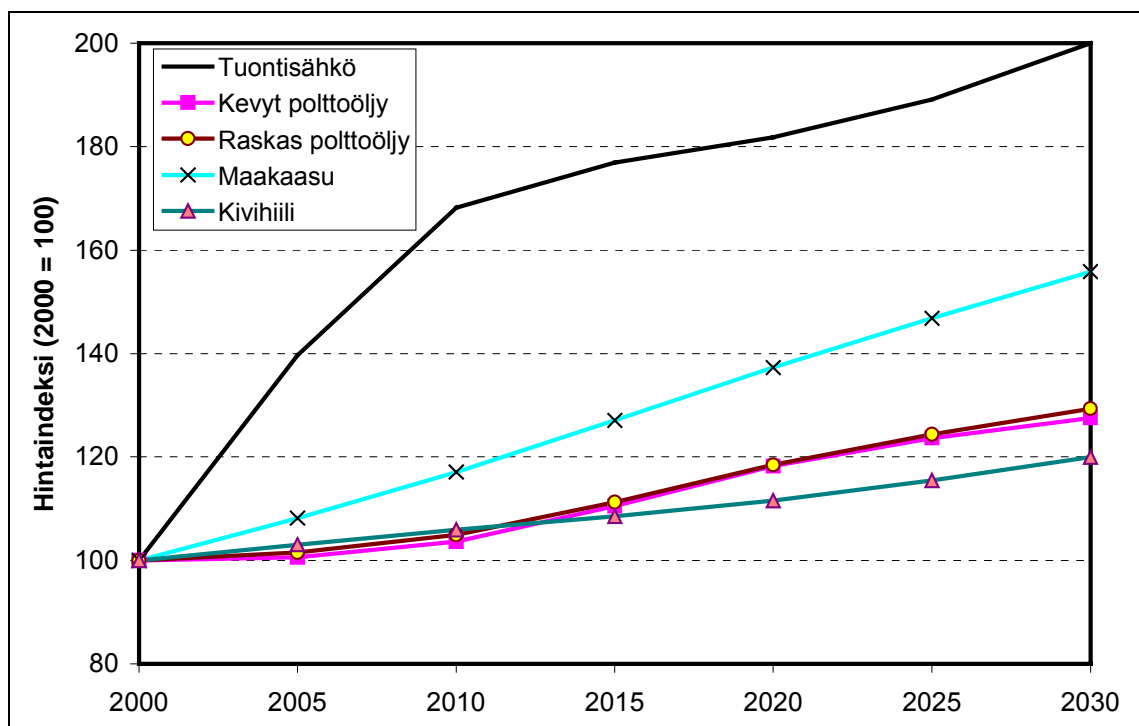


Kuva 8. Keskimääräiset talouskasvuoletukset tarkastelluissa skenaarioissa.

Työssä tarkasteltiin myös päästökaupan mahdollisia vaikutuksia Suomen energiajärjestelmään sekä tavanomaisessa että optimististen arvioiden mukaisessa tekniikan kehityksen skenaariossa. Päästökaupan sisältävää rinnakkaisversiota tarkasteltiin kuitenkin ainoastaan päästöjen 20 %:n vähennystavoitteen mukaisissa skenaarioissa.

Kaikissa skenaarioissa käytettiin mm. seuraavia keskeisiä yhteisiä oletuksia:

- ◆ Suomessa asuva väestö kasvaa hyvin hitaasti vuoteen 2025 asti, ja sen jälkeen väkiluku pysyy noin 5,3 miljoonassa.
- ◆ Kansantalous kehittyy suunnilleen tuoreimpien, eri ministeriöissä laadittujen arvioiden mukaisesti (Kuva 8). Kasvu on keskimäärin 2,6 % vuodessa vuosina 2002–2010 ja 2,1 % vuodessa vuosina 2011–2030. Teollisuuden kasvu on aluksi hieman yleistä talouskasvua nopeampaa, mutta vuoden 2010 jälkeen vuorostaan palvelujen kasvu on keskimääräistä suurempaa.
- ◆ Fossiilisten polttoaineiden verottomat hinnat nousevat vuoteen 2030 mennessä huomattavasti vuoden 2000 tasosta. Maakaasun reaalihintaa nousee voimakkaimmin yli 50 % – mutta kivihiilen hinta verraten hitaasti – noin 20 % (Kuva 9).
- ◆ Uusi 1 300 MW:n ydinvoimalaitos otetaan Suomessa käyttöön vuonna 2010, mutta sen jälkeen ydinvoimakapasiteetti säilyy samansuuruisena vuoteen 2030 asti.

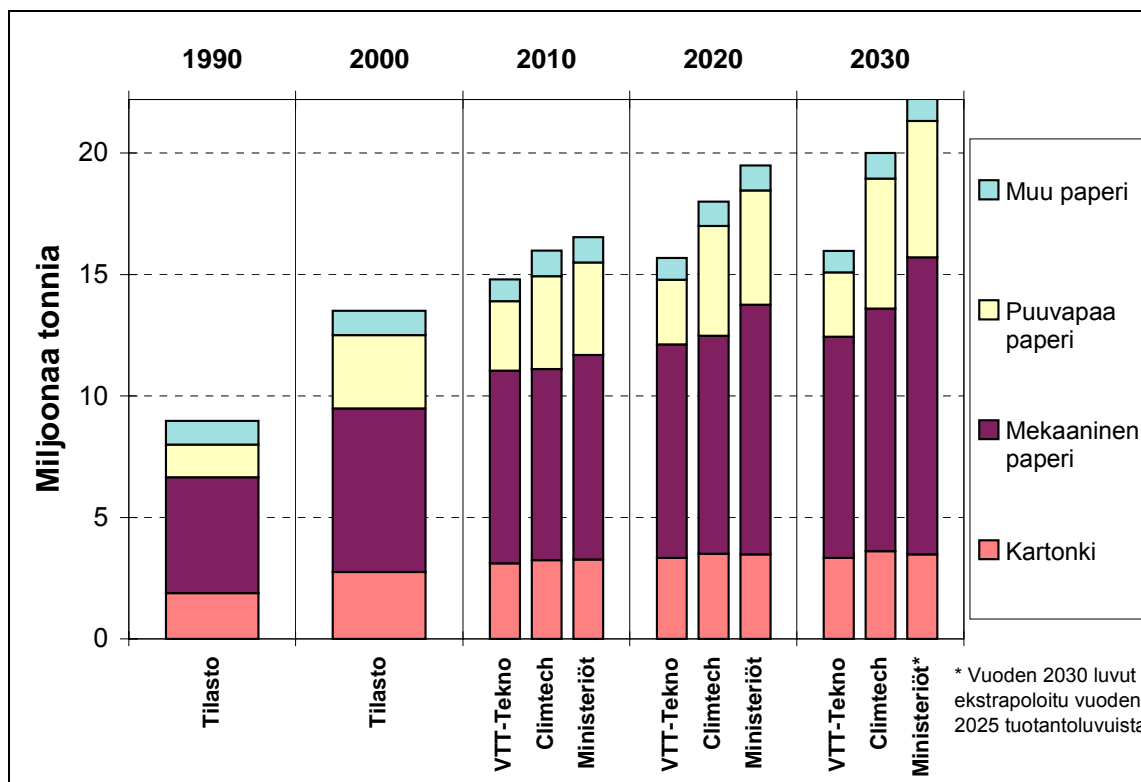


Kuva 9. Tärkeimpiä tuontienergian hintakehitystä koskevia oletuksia.

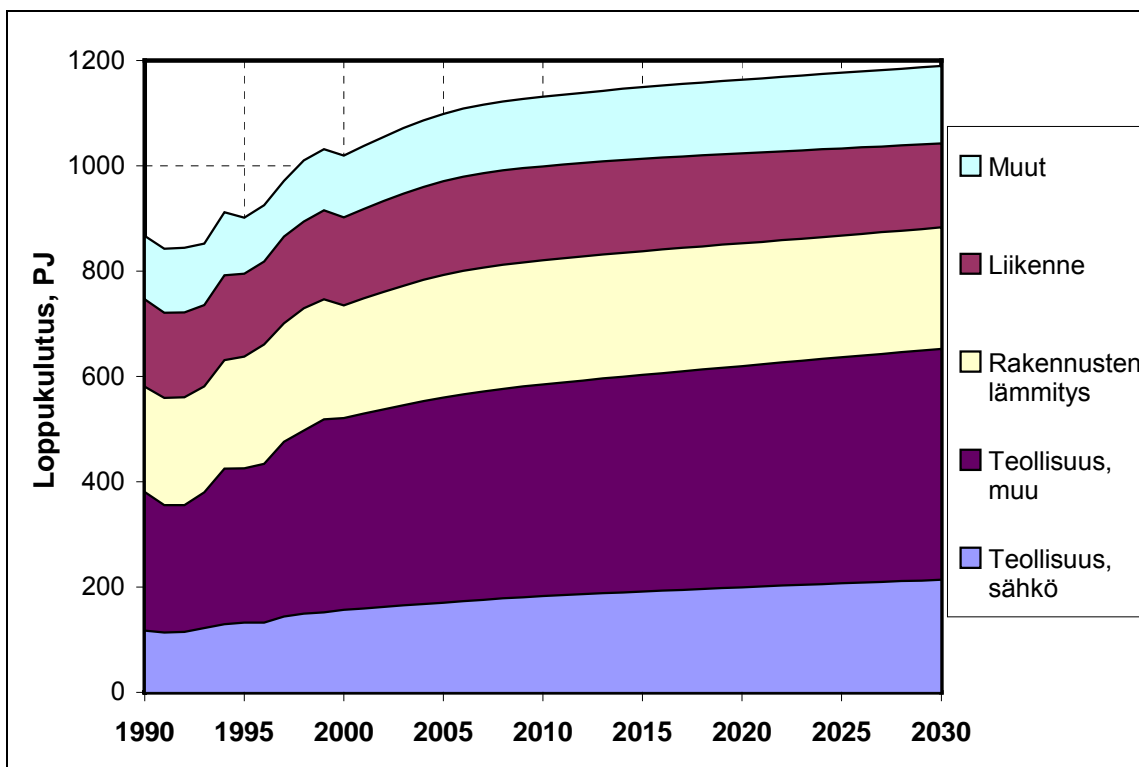
Hyötyenergian kysynnän kehitys määräytyy energiajärjestelmämallissa suurelta osin bruttokansantuotteen sektorikohtaisista kehitysarvioista. Kuten edellä mainittiin, nämä arviot perustuvat pääosin eri ministeriöiden syksyllä 2002 yhteisesti laatimiin yksityiskohtaisiin arvioihin, jotka olivat Climtech-koordinaatioryhmän käytettävissä. Ainoan merkittävän poikkeaman ministeriöiden arvioihin muodostaa metsäteollisuuden tuotannon kehitysarvio.

Climtech-skenaarioissa käytettiin paperin ja kartongin tuotantoskenaarion pohjana kansallisen ilmasto-ohjelman taustalaskelmissa käytettyä skenaariota kuitenkin siten, että vuoden 2010 jälkeisen ajan tuotantomääriä hieman pienennettiin. Tästä huolimatta tuotantomäärät ovat Climtech-skenaariossa huomattavasti suurempia kuin VTT:n metsäteollisuusasiantuntijoiden laatimassa maksimiskenaariossa (Kara et al. 2001). Ministeriöiden skenaarioon verrattuna puupitoisten papereiden tuotanto on puolestaan Climtech-skenaariossa oletettu vuoden 2010 jälkeen selvästi pienemmäksi (Kuva 10).

Talouden kehitystä koskevat skenaario-oletukset ovat kaikkiaan merkittävin energian kulutuksen kehitykseen vaikuttava tekijä. Kuvassa 11 on havainnollistettu energian loppukulutuksen kehitystä Kioto-skenaariossa. Kuten kuvan kulutusjakauman kehitys osoittaa, pääosa energian tarpeen kasvusta johtuu tulevaisuudessakin vientiteollisuuden tuotannon laajenemisesta.



Kuva 10. Joidenkin paperi- ja kartonkiteollisuuden tuotantoskenaarioiden vertailu.



Kuva 11. Energian loppukulutuksen kehitys sektoreittain Kioto-skenaariossa.

4.2 Teknologiakohtaiset skenaario-oletukset

Kaikissa skenaarioissa käytettiin edellä kuvattujen yleisten oletusten lisäksi laajasti hyödyksi Climtech-ohjelman eri projektien tuottamia arvioita teknologian kehityksestä. Optimistiseen teknisen kehityksen skenaarioon pyrittiin valitsemaan nopeaa kehitystä edustavia ja tavanomaiseen skenaarioon hieman varovaisempia arvioita. Kioto-skenaariossa ja kustannusten vertailukohtana olevassa perusurassa käytettiin tavanomaisen kehityksen mukaisia arvioita. Seuraavassa on kuvattu joitakin keskeisimpiä teknologia-kohtaisia oletuksia ja niiden perusteita.

Polttoaineiden tuotantoteknologia

Ilmaston lämpenemistä ei otettu huomioon puubiomassan vuotuisen kasvun ja korjuumahdollisuuksien oletuksissa, vaan nämä perustuvat Metsä 2010 -ohjelman arvioihin. Sen sijaan turpeen tuotannon osalta ilmaston lämpenemisen aiheuttama tuotantokustannusten lievä aleneminen otettiin huomioon. Arvio perustuu ILMAVA-projektin tuloksiin turpeen ilmastollisten tuotantoedellytysten muutoksista tulevaisuudessa (Tammelin et al. 2002) sekä VTT:n turvetuotannon asiantuntijoiden arvioihin tämän vaikutuksista tuotantokustannuksiin.

Puuperäisen bioenergian tuotantoteknologian sekä tuotantopotentiaalin arviot perustuvat Climtech-selvitykseen (Helynen et al. 2002), jonka tekijöiltä saatiin mallitarkasteluja varten arvioita polttohakkeen tuotantokustannuksista ja -mahdollisuuksista sekä pääte-hakkuiden että harvennusten ja taimikonhoidon yhteydessä. Arviot saatiin valmiiksi kahta teknologian kehityksen skenaariota varten laadittuina. Optimistisessa skenaariossa voitiin Climtech-selvityksen tekijöiden mukaan olettaa lisäksi, että hyödyntämällä jäte-lämpöjä puubiomassan kuivaamiseen, voidaan metsäteollisuuden sivutuotteena syntyvän polttohakkeen tehollista lämpöarvoa ja siten energiasaantoa lisätä edullisesti noin 15 %. Pyrolyysiöljyn tuotantokustannusarviot perustuvat sekä Climtech-selvi-tykseen että aiempiin julkaisuihin (Helynen et al. 2002, Helynen et al. 1999, Sipilä et al. 1999). Alhaisimpia arvioita käytettiin optimistisessa skenaariossa ja jonkin verran korkeampia tavanomaisessa skenaariossa.

Uusien liikennepolttoaineiden tuotantokustannusarvioita ei juuri esitetty Climtech-selvityksissä. Koska metanolin valmistus maakaasusta on nykyarvioiden mukaan merkittävästi edullisempaa kuin biomassasta, polttokennoautojen metanolin oletettiin olevan maakaasumetanolia (Ohlström et al. 2001). Etanolipohjaisten biokomponenttien valmistuskustannuksista ei ollut käytettävissä luotettavia arviota. Biokomponenttien tuotanto ei nyky näkymien mukaan tule Suomessa taloudellisesti kannattavaksi, mutta maatalouspoliittisista syistä sitä tuetaan niin EU:ssa kuin muissa maissa (Helynen et al. 2002). Tarkastelussa käytettiin arviota, jonka mukaan 15 % bioetanolia sisältävän dieselpolttoaineen tuotantokustannukset laskevat vuoteen 2030 mennessä optimistisessa skenaariossa vähän normaalin dieselöljyn kustannusten alle, mutta jäävät tavanomaisessa skenaariossa vastaavasti vähän korkeammiksi. EU:n mahdollista direktiiviä biokomponenttien vähimmäismäärästä ei otettu skenaariossa huomioon.

Sähkön ja lämmön tuotantoteknologia

Sähkön erillistuotannon, yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon sekä kaukolämmön erillistuotannon ja teollisuuden höyrykeskusten teknologioiden teknisen ja taloudellisen suorituskyvyn arviot perustuvat varsin laajasti Climtech-selvityksiin. Tuuli- ja aurinko-voiman teknologiatiedot saatiin jopa suoraan vastaavien Climtech-selvitysten tekijöiltä valmiiksi jaettuna perusarvioihin ja optimistisiin arvioihin (Peltola & Holttinen 2001, Solpros 2002). Tuulivoimaselvityksen tekijöiltä ei valitettavasti saatu arvioita tuuli-voiman edellyttämästä ylimääräisestä lisäyksestä vara- ja säätötehoon. Tarkempien tietojen puuttuessa reservitehon lisätarve otettiin skenaariotarkastelussa huomioon vain siltä osin kuin tuulivoiman nimellisteho ylittää 2 500 MW. Tämän ylittävältä osin vaadittiin rakennettavan uutta huippukaasuturbiinivoimakapasiteettia kolmannes tuuli-voiman nimellistehosta. Minivesivoiman tuotantopotentiaaliarviot perustuivat uusiu- tuvien energialähteiden edistämishjelman taustaraporttiin (Helynen et al. 1999). Opti- mistisessa skenaariossa potentiaalista oletettiin voitavan hyödyntää vuoteen 2030 men- nessä suurin osa (noin 1 TWh).

Climtech-selvityksen mukaan ilmaston muutos lisää tuulivoimalaitosten vuosituotantoa nykyiseen verrattuna arviolta 2–10 % vuoden 2030 tienoilla (Tammelin et al. 2002). Skenaariotarkastelun ohjausryhmän esityksestä arviot otettiin huomioon siten, että tuotannon lisäys on rannikolla 10 % sekä tuntureilla ja merellä 5 % vuoteen 2030 mennessä. Vesivoiman vuosituotannon oletettiin selvityksen tulosten mukaisesti kasvavan vuoteen 2030 mennessä keskimäärin 8,7 % (Tammelin et al. 2002).

Tavanomaisiin polttoaineisiin perustuvan lauhdevoiman ja yli 1 MW:n kokoluokan yhteistuotannon teknologiatiedoissa otettiin huomioon Climtech-selvitysten tulokset (Hepola & Kurkela 2002, Harmoinen et al. 2002). Koska Climtech-selvityksissä ei kuitenkaan juuri esitetty kattavia arvioita tekniikoiden keskeisistä ominaisuuksista, perusarvioiden pohjana jouduttiin yleensä pitämään edelleen vanhempien selvitysten mukaisia arvioita (Ekono 1997, Ekono 1999, Kosunen & Rauhamäki 1999, Savolainen et al. 2001, Kara et al. 2001). Climtech-ohjelman tuloksista voitiin siis käyttää hyväksi lähinnä arviot investointikustannusten sekä hyötysuhteiden kehityksestä. Toisaalta järjestelmämallin teknologiatietokanta oli erityisesti uuden teknologian osalta varsin hyvin päivitetty jo VTT:n Energy Visions 2030 -skenaariotarkasteluja varten (Lehtilä 2001), joten Climtech-selvitysten antamat lisätiedot olivat tarkastelun kannalta riittäviä. Climtech-selvitysten tekijöiltä saatiin kuitenkin yksityiskohtaista tietoa jätteen energiakäyttöön soveltuvien tekniikoiden kustannuksista (Lohiniva et al. 2001).

Polttoaineisiin perustuvan hajautetun sähköntuotannon osalta käytetty järjestelmämalli on toistaiseksi varsin puutteellinen. Alle 1 MW:n CHP-teknologioita mallissa ei ole kuvattu. Toisaalta monista muista maista poiketen Suomessa on niin paljon suuremman kokoluokan yhteistuotantopotentiaalia, että mikrokokoluokan tekniikoiden merkitys jäänee joka tapauksessa vähäiseksi, elleivät ne tule kustannuksiltaan oleellisesti edullisemmiksi. Myös käytettävissä olevat teknologian suorituskykyarviot ovat vielä epämääräisiä verrattuna yli 1 MW:n kokoluokkien laitoksiin (esim. Vartiainen et al. 2002).

Teollisuuden energian loppukäyttö- ja prosessiteknologia

Teollisuuden energian käytön tehostamismahdollisuuksia käsitteli ohjelmassa konkreettisesti lähinnä vain bioteknisiä menetelmiä mekaanisen massan valmistuksessa analysoinut selvitys (Kallioinen et al. 2003). Selvityksen tuottamat tehostamistoimia koskevat teknis-taloudelliset tiedot hyödynnettiin laajasti skenaariotarkasteluissa. Tehostustoimien ohella merkittävää ja edullista potentiaalia teollisuusprosessien päästöjen vähentämiseksi on arvioitu olevan ainakin sellutehtaiden meesauunien polttoprosessissa, sementin valmistuksessa sekä typpihapon valmistuksessa. Näiden osalta Climtech-ohjelma ei tuonut esiin uutta tietoa, joten teknologia-arviot perustuvat muihin selvityksiin (mm. Kuiper 2001, Dahlbo et al. 2000, Powertechnics 1998).

Kiinteistöjen rakennus-, lämmitys- ja jäähdytysteknologia

Uudisrakentamisen lämmöneristysnormien tiukentuminen 30 %:lla otettiin kaikissa skenaarioissa (perusuraa lukuun ottamatta) sellaisenaan huomioon. Lisäksi skenaarioissa käytettiin hyväksi Climtech-teknologiakartoituksessa laaditut arviot korjausrakentamisen potentiaalista ja kustannuksista (Savolainen et al. 2001).

Kiinteistöjen lämmitysteknologiaa on käsitelty Climtech-ohjelman bioenergiaselvityksessä (Helynen et al. 2002). Teknologioita on kuvattu samalla vaihtoehtojen kattavuudella myös hieman vanhemmassa Bioenergia-ohjelman raportissa (Flyktman 1999), jossa on lisäksi tarkempia kustannustietoja. Skenaariotarkastelussa lähtökohtana käytettiin näitä selvityksiä. Aurinkolämmön osalta voitiin kuitenkin tukeutua Climtech-selvitykseen (Solpros 2002), jonka tekijöiltä saatiin yksityiskohtaiset, skenaariokohtaiset arviot teknologian kehityksestä. Lämpöpumppujen kehitysarvioiden osalta jouduttiin turvautumaan vanhempiin selvityksiin (ks. esim. Savolainen et al. 2001), sillä Climtech-ohjelmassa niitä käsiteltiin valitettavan pinnallisesti (Vartiainen et al. 2002). Kiinteistöjen jäähdytyksen osalta skenaarioissa otettiin huomioon VTT:ssä laaditut arviot kaukojäähdytyksen kehityksestä.

Kotitalouksien ja palvelujen laitesähkön käyttö

Kotitalouksien ja toimistotilojen laitesähkön käytön tehostusmahdollisuuksia kartoitettiin Climtech-ohjelman selvityksessä (Korhonen et al. 2002). Selvityksen tulokset hyödynnettiin skenaariotarkastelussa. Laitesähkön käytön osalta jouduttiin selvityksen identifioima edullinen tehostuspotentiaali kuitenkin rajaamaan kotitalouksiin, sillä toimistojen tehostustoimien kustannuksista ei esitetty arviota. Tehostustoimien oletettiin voivan toteutua selvityksen mukaisin edullisin kustannuksin vain optimistisessa skenaariossa. Tavanomaisessa skenaariossa sovellettiin varovaisempia kustannusarvioita. Luonnollisesti tarkastelussa otettiin huomioon myös palvelujen laitesähkön käytön tehostusmahdollisuudet, mutta niiden kustannusarviot perustuivat vanhempiin selvityksiin (ks. esim. Lehtilä & Tuhkanen 1999).

Liikenneteknologia

Tavanomaisten ajoneuvotekniikoiden kehitysarviot perustuivat suurelta osin VTT:n LIISA-mallissa käytettyihin arvioihin. LIISA-malli kuuluu laajaan LIPASTO-mallijärjestelmään, jonka kehitysarvioita ja päästökertoimia käytettiin tarkastelussa laajasti hyväksi (Mäkelä et al. 2002). EU:n autonvalmistajien kanssa tekemän sopimuksen vaatimukset henkilöautojen polttoaineenkulutuksen alenemisesta oletettiin toteutuviksi, mutta vasta vuoteen 2015 mennessä. Polttokenno- ja hybridautoteknologian teknisen suorituskyvyn kehitysarviot perustuvat kansainvälisiin selvityksiin. Uusien ajoneuvotekniikoiden kustannusten kehityksestä ei kovin luotettavia arvioita ole käytettävissä.

Tarkastelussa päädyttiin asettamaan polttokennoautojen kustannukset optimistisessa skenaariossa sellaiselle tasolle, että ne tulevat juuri ja juuri kilpailukykyisiksi noin vuonna 2015. Investointikustannuksiltaan ne jäävät tällöinkin toki jonkin verran perinteisiä tekniikoita kalliimmiksi. Tavanomaisessa skenaariossa polttokenno- ja hybridi-autojen ei oletettu tulevan laajassa mitassa kilpailukykyisiksi. Kummassakin skenaariossa oletettiin lisäksi sähköpakettiautojen kustannusten alenevan nykyisestä, tuntuvimmin optimistisessa skenaariossa.

Jätehuolto- ja maatalousteknologia

Jätehuollon osamalli uudistettiin perusteellisesti Climtech-skenaariotarkasteluja varten Suomessa vuonna 2002 virallisesti käyttöön otetun dynaamisen metaanipäästöjen laskentamenetelmän mukaiseksi. Kaatopaikkakaasun talteenoton ja REF-polttoaineen valmistuksen teknologiatiedot päivitettiin Climtech-selvitysten tulosten perusteella (Lohiniva et al. 2001, Tuhkanen 2002). Optimistisessa skenaariossa energiakäyttöön hyödynnettävän kaatopaikkakaasun osuuden arvioitiin voivan kasvaa jopa 80 %:iin.

Myös maatalouden osasysteemin kuvaus päivitettiin perusteellisesti Climtech-skenaariotarkasteluja varten. Maatalouden tuotantoskenaariot ja päästöjen kehityksen perusura vastaavat siten tuoreimpia ennusteita. Lannankäsittelyteknologiat ovat keskeisimpiä päästöjen vähennystekniikoita. Niiden teknis-taloudelliset kehitysarviot perustuvat aiemmin VTT:ssä tehtyihin selvityksiin (Pipatti et al. 2000, Lehtilä & Tuhkanen 1999).

F-kaasujen päästöjen vähennysteknologia

Fluorattujen kasvihuonekaasujen päästöjen (HFC, PFC, SF₆) kehitysarviot ja päästöjen vähentämisteknologiaa koskevat tiedot saatiin suoraan Climtech-selvityksen tekijöiltä (Oinonen & Soimakallio 2001). Climtech-ohjelman koordinaatioryhmän toimeksiannosta selvityksen tekijät laativat aiemmin julkaistujen arvioiden rinnalle uuden, optimistisen skenaarion vähennysteknologian kehityksestä. Alkuperäisiä arvioita voitiin käyttää tavanomaisen kehityksen skenaariossa. Kumpiakin arvioita täydennettiin kuitenkin tarkastelua varten vielä joillakin lisävähennystoimilla.

CO₂-erotus- ja loppusijoitusteknologia

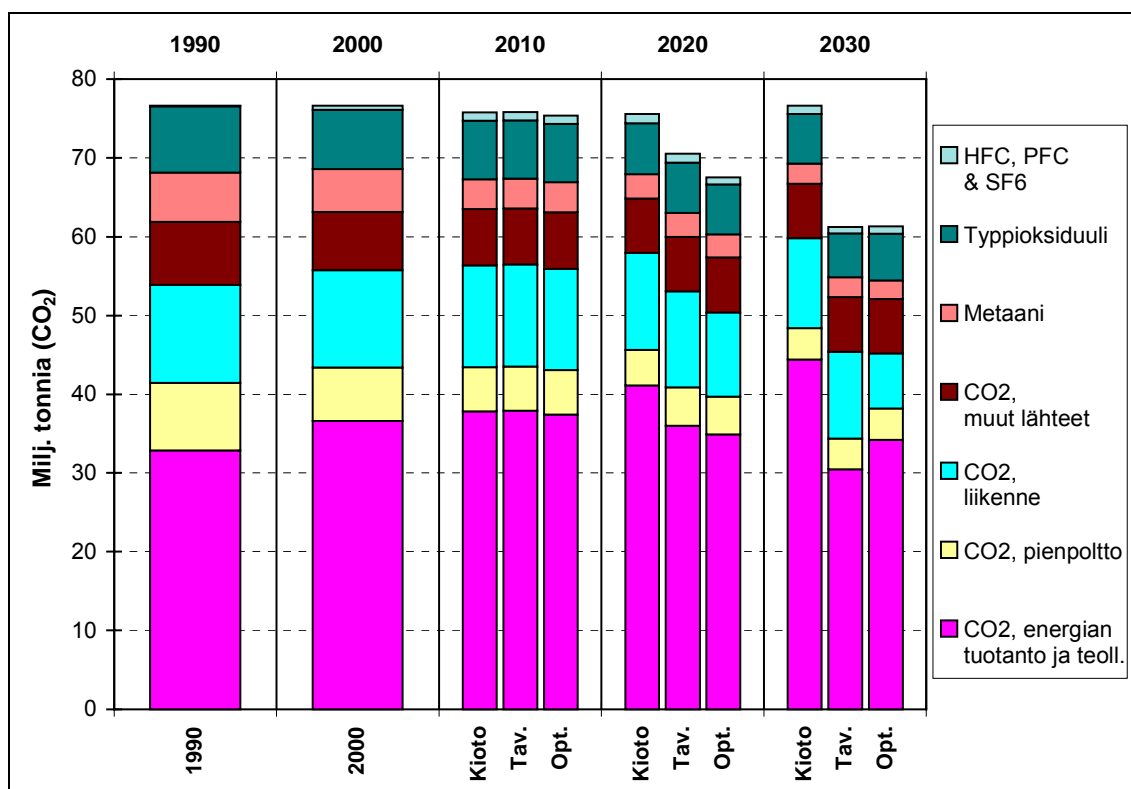
Hiilidioksidin erotus- ja loppusijoitusteknologiaa käsitelleessä Climtech-selvityksessä (Koljonen et al. 2002) esitettyjä teknis-taloudellisia tuloksia ei käytetty suoraan skenaariotarkastelussa. Mallitarkastelua varten mahdolliseksi CO₂-erotusteknologian suomalaiseksi käyttökohteeksi valittiin Raahen rauta- ja terästehdas, jossa sekä hiilidioksidipäästöjen volyymit että pitoisuudet ovat suuria. Arviot teknologian teknis-taloudellisesta kehityksestä masuunikaasukombilaitoksen yhteyteen rakennettuna saatiin Climtech-selvityksen tekijältä.

5. Skenaariotarkastelujen tuloksia

5.1 Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys

Jos kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseksi ei tehtäisi Suomessa erityisiä lisätoimia, päästöjen kokonaismäärä kasvaisi mallilaskelmien mukaan vuoden 1990 noin 77 miljoonasta tonnista vuoteen mennessä 2010 noin 90 miljoonaan tonniin. Vuonna 2030 päästöt olisivat jo noin 100 miljoonaa tonnia. Tässä ns. perusuraskenaariossa ei ole otettu huomioon uutta ydinvoimalaitosta.

Uusi ydinvoimalaitos hidastaa päästöjen kasvua, mutta ei läheskään riittävästi asetettujen päästötavoitteiden kannalta. Päästöjen rajoittamista simuloivissa skenaarioissa jouduttiin siten olettamaan nykyistä energiaverotus- ja tukijärjestelmää voimakkaampia ohjaustoimia. Kioto-skenaariossa oletettiin käytettävän entistä verorakennetta siten, että vuonna 2003 voimassa olleita veroja nostetaan vuoteen 2010 mennessä 60–80 prosenttia. Teknologian merkitystä analysoitiin kuitenkin perusteellisemmin simuloimalla kustannustehokkaita päästöjen vähennyksiä tavanomaisessa ja optimistisessa teknologian kehityksen skenaarioissa. Niissä oletettiin, että nykyinen verotusjärjestelmä korvattaisiin vuoteen 2030 mennessä puhtaalla kasvihuonekaasujen päästöverolla.

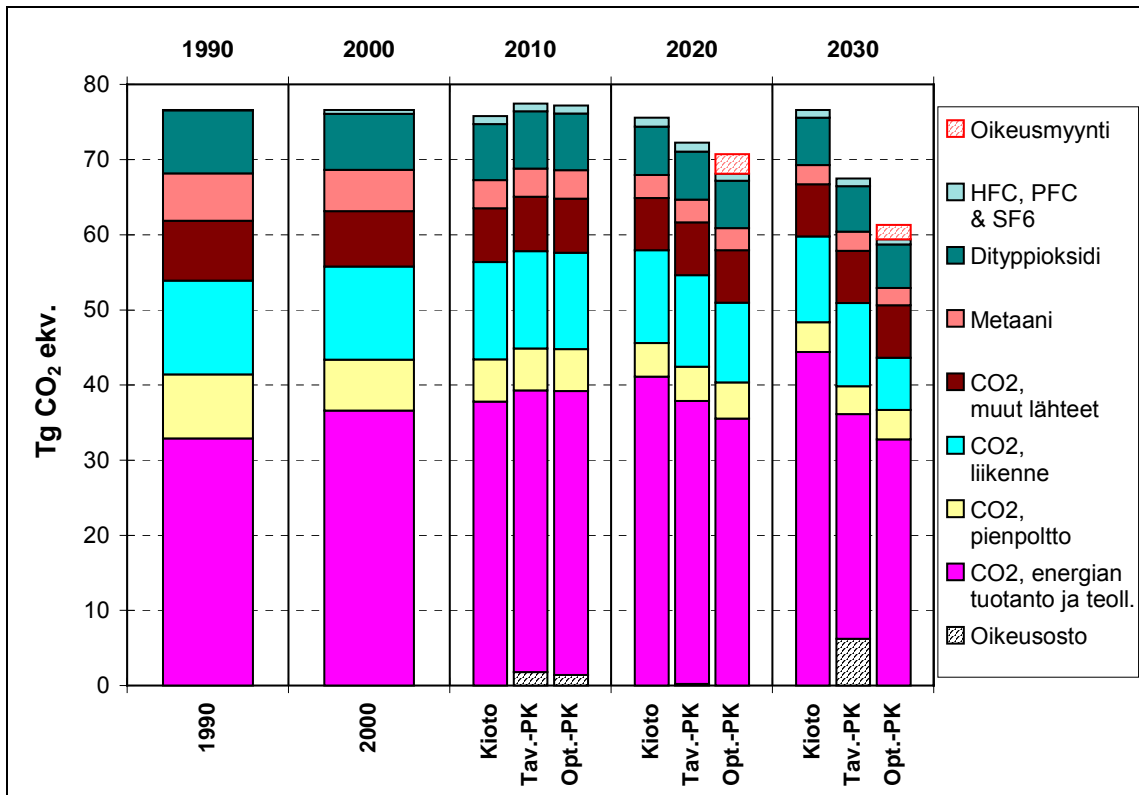


Kuva 12. Kasvihuonekaasujen päästöt pääluokittain skenaarioiden perusvarianteissa vuosina 1990–2030.

Kaikissa kolmessa skenaariossa päästöjen kehitys on vuoteen 2010 saakka suunnilleen samanlainen (Kuva 12). Maailmanlaajuisen kehityssuunnan mukaisesti energiantuotannon ja liikenteen päästöt pyrkivät myös Suomessa kasvamaan eniten. Metaanipäästöjä ja pienpolton hiilidioksidipäästöjä voidaan puolestaan kivuttomimmin vähentää vuoden 1990 tasosta. Uuden ydinvoimalaitoksen käyttöönotto on silti Kioton tavoitteen saavuttamisen kannalta keskeisin yksittäinen toimi.

Energian tuotannon päästöt suurenevät aina vuoteen 2030 saakka, mikäli uusia päästötavoitteita ei aseteta vuoden 2010 jälkeen. Tiukempien päästötavoitteiden skenaarioissa tuotannon päästöt sen sijaan alkavat vähentyä. Jyrkimpiin vähennystoimiin joudutaan tavanomaisen kehityksen skenaariossa, jossa energian tuotannon päästöjä joudutaan rajoittamaan jopa alle vuoden 1990 tason.

Liikenteen päästöjen määrä alkaa vähentyä vuoteen 2030 mennessä kaikissa skenaarioissa. Optimistisessa tekniikan kehityksen skenaariossa liikenteen päästöt voisivat jopa lähes puolittua vuoden 2000 määrästä. Metaanipäästöjen ja pienpolton hiilidioksidipäästöjen väheneminen jatkuu kaikissa skenaarioissa vuoden 2010 jälkeenkin. Tulosten mukaan myös fluorattujen kaasujen päästöjä kannattaa rajoittaa tuntuvasti, 60–70 prosenttia perusarvion mukaisesta määrästä vuonna 2030.



Kuva 13. Kasvihuonekaasujen päästöt päälukittain skenaarioiden päästökauppa-varianteissa vuosina 1990–2030.

Kun päästökauppa otetaan tarkasteluun mukaan, tavanomaisen ja optimistisen skenaarion erot korostuvat (Kuva 13). Tavanomaisessa skenaariossa päästöoikeuksia kannattaa ostaa vuonna 2030 runsaat 6 milj. tonnia CO₂ vuonna 2030, kun taas optimistisessä skenaariossa oikeuksia kannattaa myydä noin 2 milj. tonnin edestä. Tämä merkitsee sitä, että todellinen päästöjen vähennys jää tavanomaisessa skenaariossa vain 12 %:iin, mutta optimistisessä skenaariossa se nousee 22 %:iin.

Päästöoikeuksien osto ja myynti vaikuttavat luonnollisesti suorimmin juuri energian tuotannon ja prosessiteollisuuden päästöihin. Kummassakin tulevaisuudenkuvassa päästökauppa vaikuttaa tulosten mukaan vuoden 2030 tilanteessa voimakkaimmin teollisuuden sähkön ja lämmön tuotannon päästöihin. Vuonna 2010 vaikutukset ovat absoluuttisesti suurimpia kaukolämpövoiman tuotannossa, mutta suhteellisesti suunnilleen yhtä suuria myös erillisessä sähkön tuotannossa.

5.2 Primaarienergiälähteiden hankinta

Päästöjen vähentämisen kannalta edullisimmat teknologiavalinnat heijastuvat selvästi primaarienergian kokonaiskulutuksen kehitykseen (Kuva 14). Uusiutuvien energialähteiden osuus kokonaiskulutuksesta nousee sitä suuremmaksi, mitä tiukempi vuoden 2030 päästötavoite on. Kun uusiutuvien osuus oli vuonna 2000 lähes 25 prosenttia, se kasvaa vuoteen 2030 mennessä Kioto-skenaariossa 28 prosenttiin, tavanomaisessa rajoitusskenaariossa 34 prosenttiin ja optimistisessä skenaariossa jopa 37 prosenttiin kokonaiskulutuksesta.

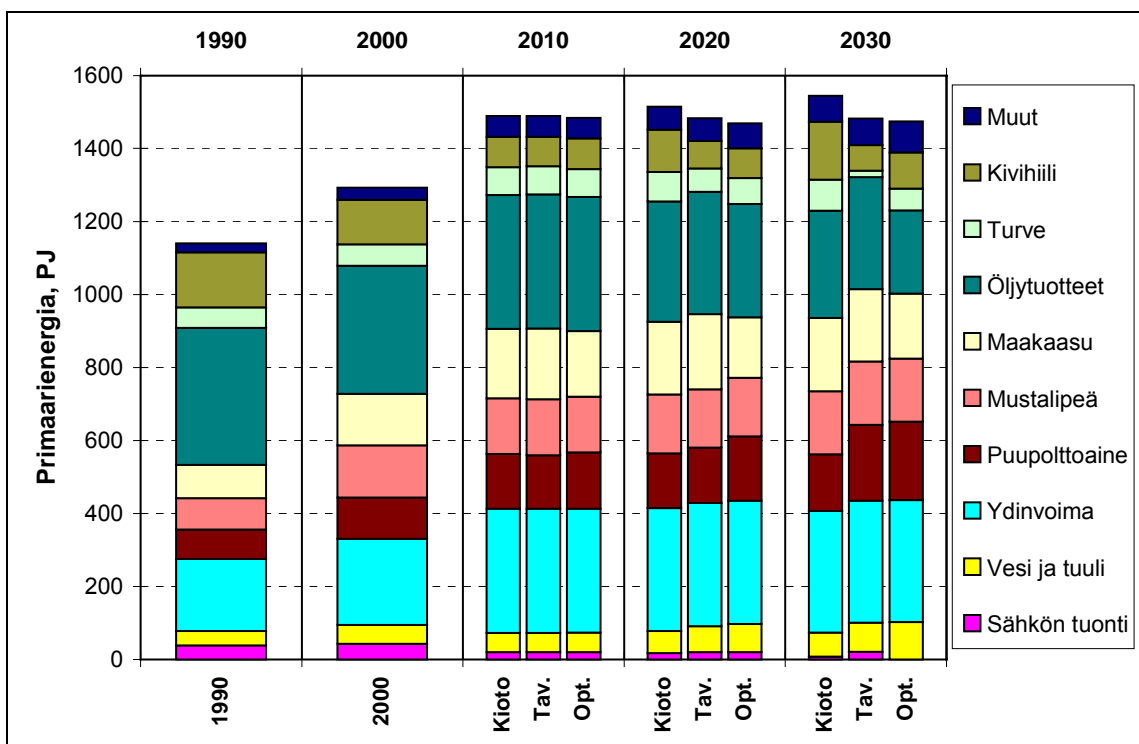
Kokonaisenergiataseessa bioenergian hyödyntäminen kasvaa määrällisesti eniten. Puupolttoaineita käytetään vuoteen 2030 mennessä 20–70 prosenttia enemmän kuin vuonna 2000 eli 30–90 PJ, kun mustalipeää ei lasketa mukaan. Kaikissa kolmessa skenaariossa jätettä hyödynnetään runsaat 20 PJ vuosittain. Myös vesi- ja erityisesti tuulivoimaa hyödynnetään merkittävästi nykyistä enemmän.

Fossiilisten polttoaineiden ja turpeen yhteenlaskettu kulutus pysyy Kioto-skenaariossa suunnilleen nykyisen suuruisena, mutta alkaa vähentyä tiukemmissa päästöjen rajoitusskenaarioissa vuoden 2010 jälkeen. Vaikka maakaasun kulutus kasvaa kaikissa skenaariossa merkittävästi nykyisestä, kulutus kääntyy muita polttoaineita nopeamman hinnan nousun vuoksi laskuun vuoden 2020 jälkeen. Tavallista kivihiilen käyttöä kannattaa Kioto-skenaariossa lisätä vuoden 2010 jälkeen, kun taas tiukemmissa skenaarioissa kivihiilen kulutus vähenee peräti 30–50 prosenttia vuodesta 2000. Perusmetallien jalostuksessa käytettävän metallurgisen kivihiilen ja koksen käyttö sen sijaan kasvaa tasaisesti, sillä nykyinen tuotantotekniikka ei tarjoa sille juuri vaihtoehtoja.

Turpeen käyttöä joudutaan tavanomaisen tekniikan kehityksen skenaariossa runsaasti vähentämään, mutta muissa skenaarioissa sitä voidaan jopa hieman lisätä nykyisestä. Turpeen käytön voimakas vähentäminen tavanomaisessa skenaariossa perustuu laajaan kaasutusteknologian käyttöönottoon. Bioenergian poltto esimerkiksi leijukerroskattiloissa edellyttää nimittäin polttoteknisistä syistä usein myös runsasta turpeen käyttöä, joka voidaan välttää kaasutusteknologialla. Fossiilisten polttoaineiden kulutuksen väheneminen kohdistuu tuntuvana myös öljyyn. Sen kokonaiskäyttö vähenee optimistisessä skenaariossa jopa yli kolmanneksen vuoteen 2030 mennessä, erityisesti liikenteen ajoneuvoteknologian kehityksen ansiosta.

Bioenergian kokonaiskäytöstä mustalipeä käsittää nykyisin hieman yli puolet. Suurin osa muusta bioenergiasta koostuu erilaisista puuperäisistä kiinteistä polttoaineista (Kuva 15). Pääte- ja harvennushakkuiden yhteyteen integroiduilla metsäpolttoaineen tuotantoteknologioilla voidaan puupolttoaineiden taloudellista käyttöpotentiaalia runsaasti laajentaa.

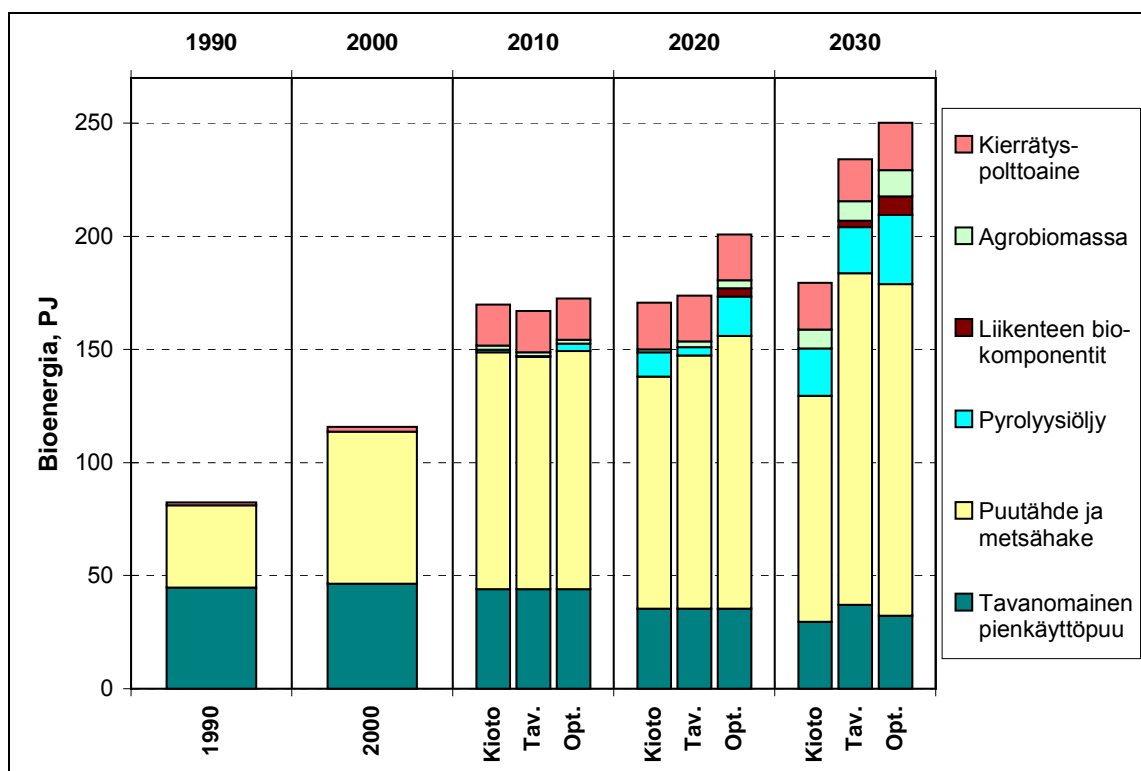
Tulevaisuudessa bioenergian lähteet ja käyttömuodot voivat monipuolistua huomattavasti kierrätyspolttoaineiden, pelto- eli agrobiomassan, puutähteistä valmistetun pyrolyysiöljyn sekä liikennepolttoaineiden lisäaineeksi tarkoitetun etanolin tuotannon ja tuonnin myötä. Mallilaskelmissa bioetanolin oletettiin olevan tuontipolttoaine mutta muiden bioenergiälähteiden täysin kotimaisia.



Kuva 14. Primaarienergian kokonaiskulutus energialähteittäin eri skenaarioissa vuosina 1990–2030.

Uusista bioenergiälähteistä erityisesti pyrolyysiöljyn ja kierrätyspolttoaineiden tuotantoteknologiat ovat tulosten valossa keskeisiä päästöjen rajoittamisessa. Pyrolyysiöljyn tuotanto- ja käyttöteknologian kehittäminen näyttäisi olevan lupaava keino saada sekä edullista päästöjen rajoittamisen lisäpotentiaalia että merkittävää uutta liiketoimintaa energiateknologian alalle. Myös Suomen oloihin sopivilla peltobiomassojen tuotantoteknologioilla on tuntuva, joskin edellä mainittuja teknologioita pienempi potentiaali. Peltobiomassojen tuotanto nousee suurimmaksi optimistisessä skenaariossa, jossa se on noin 11 PJ vuonna 2030.

Biopolttoaineiden kansainväliset markkinat ovat kehittyneet Itämeren alueella jo huomattaviksi. Tulevaisuudessa on mahdollista, että biopolttoaineiden laaja vienti Suomesta lähialueille tulee kannattavaksi. Kansainväliset markkinat saattavat tällöin nostaa bioenergian kotimaista hintatasoa. Vaikka markkinoiden kehittyminen olisi positiivinen asia kotimaiselle biopolttoaineiden tuotannolle ja tuotantoteknologian kehitykselle, se voi siis myös vaikeuttaa kansallisten päästötavoitteiden saavuttamista vähentämällä bioenergian kotimaista kysyntää.



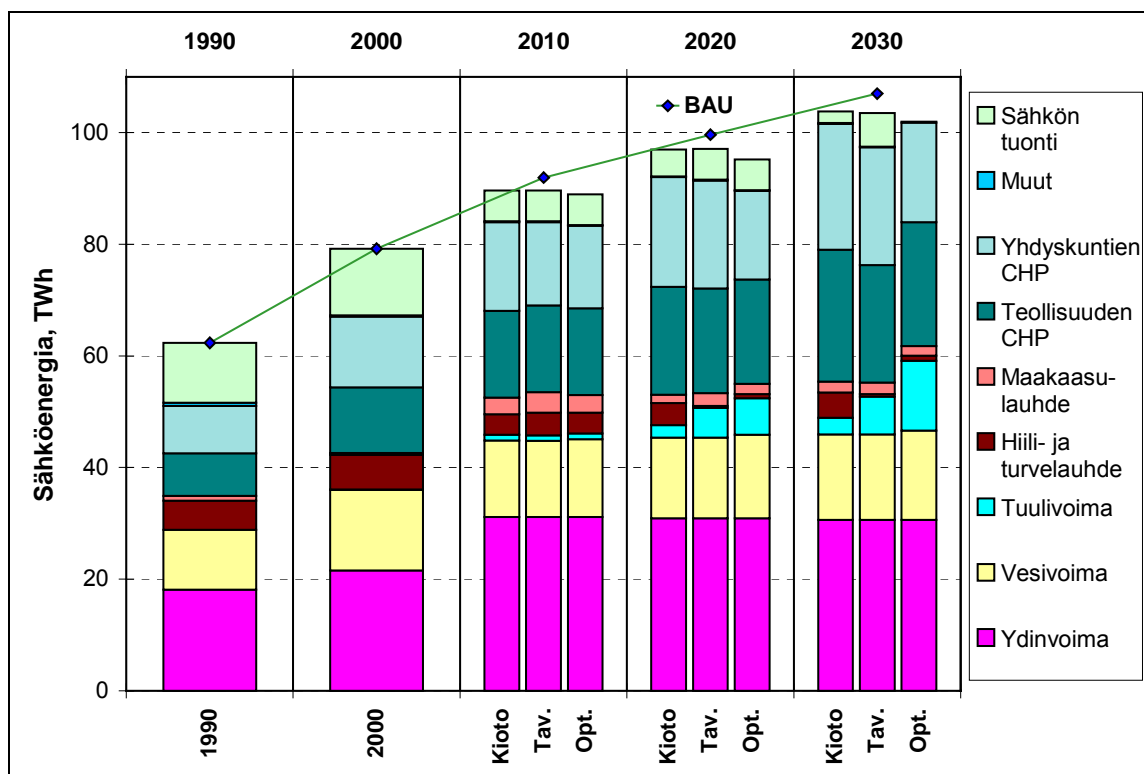
Kuva 15. Bioenergian hankinta päälähteittäin eri skenaarioissa vuosina 1990–2030.

5.3 Sähköenergian hankinta ja kokonaiskulutus

Sähköenergian tuotannon teknologiavalinnat ovat hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kannalta varsin keskeisiä. Suurimmat muutokset sähkön hankinnan perusrakenteessa koskevat erillistä sähköntuotantoa sekä sähkön tuontia (Kuva 16). Mitä tiukemmaksi päästötavoitteet tulevat, sitä vähäisemmäksi tavanomaisen lauhdevoiman tuotanto supistuu. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon osuus kasvaa, mutta kasvu saattaa tulosten mukaan pysähtyä noin 40 %:n tasolle.

Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden tuotantokapasiteetin riittävyyden heikentyessä sähkön tuontimahdollisuuksien oletetaan supistuvan merkittävästi. Tämä saattaa kasvattaa sähköntuotannon kotimaisia päästöjä ja vaikeuttaa päästötavoitteiden saavuttamista. Toisaalta sähkön tuontihintojen oletetaan nousevan huomattavasti, joten tuonti ei ole välttämättä enää edullista.

Suomen tuulivoiman tuotanto kasvaa kaikissa kolmessa skenaariossa noin 14-kertaiseksi vuodesta 2002 vuoteen 2010 mennessä ja 40–160-kertaiseksi vuoteen 2030 mennessä. Ilmaston muuttuminen tuulisemmaksi lisää omalta osaltaan jonkin verran tuulivoimalaitosten vuotuista sähköntuotantoa. Optimistisessa tapauksessa tuulivoiman

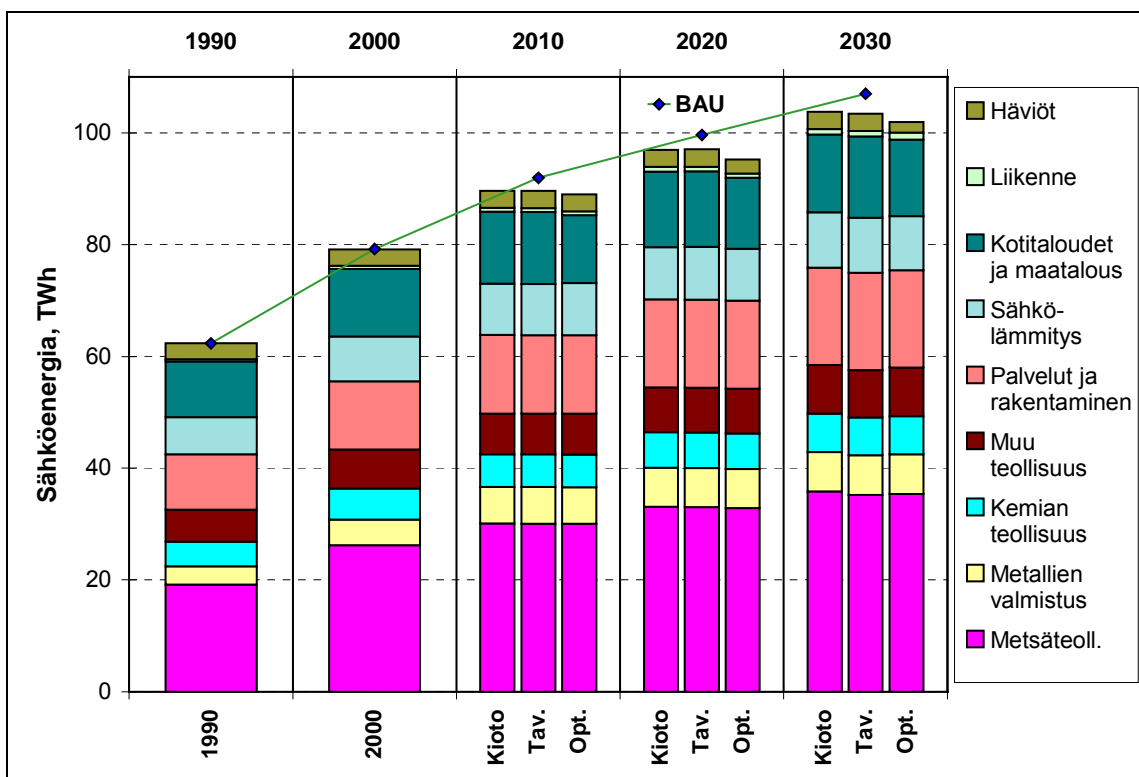


Kuva 16. Sähköenergian kokonaishankinnan rakenne eri skenaarioissa vuosina 1990–2030.

investointikustannukset pienenevät selvästi, ja tuotannon lisääminen osoittautuu edulliseksi aina 12,5 terawattituntiin asti vuonna 2030. Tuulivoima on siten eräs merkittävimmistä, ellei jopa merkittävin yksittäinen teknologia, jonka järjestelmiä kehittämällä päästöjä voidaan vähentää kohtuullisen edullisesti.

Vesivoiman tuotanto kasvaa pelkästään ilmaston muutoksen aiheuttaman valuman kasvun myötä Climtech-selvityksen mukaan noin 8,5 prosenttia vuoteen 2030 mennessä (Tammelin et al. 2002). Tämän lisäksi kaikissa skenaarioissa on otettu huomioon vanhojen laitosten vähittäisellä uudistamisella saatava lisäteho. Suomessa on kuitenkin myös kohtuullisen merkittävä minivesivoimapotentiaali. Helpoimmin hyödynnettävien kohteiden vuosituotannoksi on arvioitu noin 0,35 terawattituntia, mutta kokonaispotentiaaliksi on arvioitu noin 1 terawattitunti (Helynen et al. 1999). Optimistisessa skenaariossa koko tämä potentiaali oletettiin voitavan hyödyntää samoin ominaisinvestoinnein kuin helpoimmin hyödynnettävät kohteet.

Aurinkokennoihin perustuva sähköntuotanto on jo nykyisin saavuttanut aseman pienimuotoisessa erityiskohteiden tuotannossa. Mallilaskelmien mukaan rakennuksiin integroidut aurinkosähköjärjestelmät voivat kannattaa Suomessa laajemmin vasta vuosina 2025–2040. Läpimurto jo vuoden 2025 tienoilla edellyttää kuitenkin sekä nopeaa teknologian kehitystä että varsin kireitä päästöjen rajoitustoimia, sillä aurinko-



Kuva 17. Sähköenergian kokonaiskulutus sektoreittain eri skenaarioissa vuosina 1990–2030.

sähkö pääsee tulosten mukaan laajemmin markkinoille ennen vuotta 2030 vain optimistisessä skenaariossa, jossa päästöjen vähennystavoite on 30 prosenttia. Mainittakoon, että aurinkoenergiateknologiat olivat laskelmissa ainoa tekniikkaryhmä, jolle oletettiin myönnettävän investointitukea vuoden 2020 jälkeen. Laskelmissa oletettiin aurinkosähkölle 20 %:n investointituki vielä vuonna 2030. Mikäli investointituki olisi tätäkin suurempi, teknologian käyttöönotto luonnollisesti nopeutuisi Suomessa.

Fossiilisiin polttoaineisiin perustuvien lauhdevoimalaitosten rooli jää vuoden 2010 jälkeen hyvin marginaaliseksi tiukempien päästörajoitusten skenaarioissa. Kioto-skenaariossa uutta hiili- ja maakaasulauhdevoimaa kannattaa rakentaa rajoitetussa määrin vielä vuoden 2010 jälkeen. Polttokennoteknologia ei tulosten mukaan tule Suomessa sähköntuotannossa kilpailukykyiseksi edes optimistisin tekniikan kehityksen oletuksin.

Kuten jo sähköntuotannosta koskevista tuloksista voitiin nähdä, sähköenergian kokonaiskulutuksessa ei ole kovin suuria eroja eri skenaarioiden välillä (Kuva 17). Suurimmat suhteelliset erot ilmenevät häviöiden määrässä, kotitaloussähköntuotannossa sekä liikenteen sähköenergian käytössä. Sähköntuotannossa häviöiden oletettiin optimistisessä skenaariossa alenevan lähes puoleen nykyisestä uuden teknologian käyttöönoton myötä. Oletukset perustuvat VTT:ssä laadittuun pitkän tähtäimen energia- ja ympäristöselvitykseen (Kara et al. 2001).

Kotitaloussähköntuotannosta johtuvat puolestaan siitä, että vain optimistisessä skenaariossa oletettiin tehostuspotentiaali voitavan hyödyntää Climtech-selvityksen mukaisin edullisin kustannuksin (Korhonen et al. 2002). Jo perusuraskenaariossa on otettu huomioon kotitaloussähköntuotannossa laitekannan uusiutumisen aikaan saama tehostuminen, joten tätä suuremmat säästöt voivat olla arvioitua vaikeampia toteuttaa. Liikenteen sähköntuotannosta nostaa optimistisessä skenaariossa sähköpakettiautojen laaja käyttöönotto taajamien kevyissä tavarakuiluissa.

5.4 Yhdyskuntien sähköntuotanto ja lämmön tuotanto

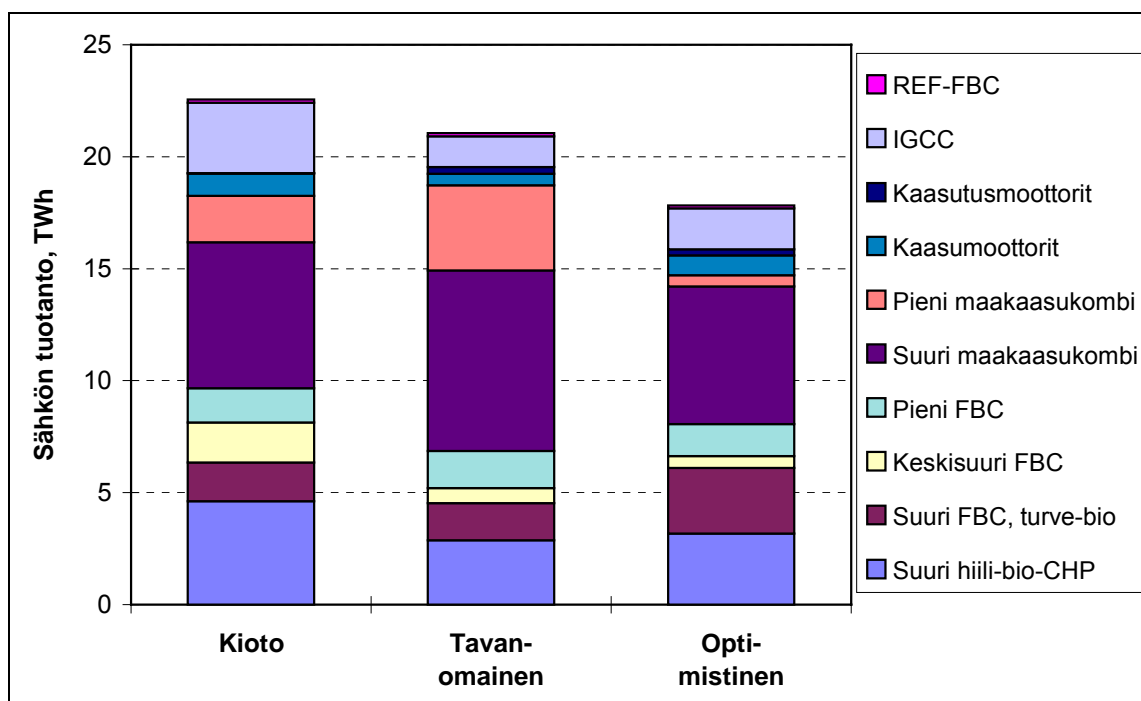
Kaukolämmön tuotannossa tärkeimpiä sähköntuotanto- ja lämmön yhteistuotantotekniikoita ovat nykyisin suuret ja keskikokoiset, pääasiassa hiilen tai turpeen käyttöön pohjautuvat höyryturbiinivoimalaitokset sekä kaasuturbiinikombilaitokset, joissa jäte- ja lämpöenergiaa hyödynnetään vielä höyryturbiinissa lisäsähköntuotantoon.

Mallin tulosten mukaan nämä tekniikat säilyttävät uusien tekniikoiden rinnalla verraten hyvin asemansa vuoteen 2030 saakka (Kuva 18). Maakaasukombiteknologia nousee kaukolämpövoiman tuotannossa kaikkiaan tärkeimmäksi yksittäiseksi teknologiaksi, jonka merkitys korostuu erityisesti tavanomaisen kehityksen tapauksessa. Leiju-

kattilatekniikan sovellukset laajenevat nopean tekniikan kehityksen skenaariossa pienikokoiseen, hajautettuun yhteistuotantoon.

Hiiltä käyttäviin isoihin höyryturbiinilaitoksiin on tulosten mukaan edullista rakentaa biopolttoaineiden kaasuttimia jo vuodesta 2010 alkaen. Laitosten kilpailukyky säilyisi näin vuoteen 2030 saakka myös tiukkojen päästörajoitusten vallitessa. Kaasuttimia kannattaa myöhemmin rakentaa myös suuriin maakaasukombilaitoksiin, joiden turbiinit soveltuvat biokaasun käyttöön tukipolttoaineena. Yhdistämällä kaasuttimia perinteisempää tekniikkaa käyttäviin suuriin yhteistuotantolaitoksiin näiden polttoainevalikoimaa voidaan laajentaa tehokkaalla tavalla biopolttoaineisiin.

Tukikaasuttimien ohella myös polttoaineen kaasutukseen kiinteästi pohjautuvat integroidut kaasutusvoimalaitokset saavat jalansijaa sekä tavanomaisen että optimistisen teknisen kehityksen skenaariossa. Pienikokoisia biomassan kaasutusmoottoreita otetaan käyttöön hajautetussa tuotannossa. Suurempia, kaasuturbiineihin perustuvia integroituja kaasutuskombilaitoksia tulee käyttöön vuosina 2020–2030. Tulosten mukaan pääpolttoaineena näissä yhdyskuntien IGCC-laitoksissa olisi hiili, mutta biopolttoaineita käytettäisiin merkittävästi tukipolttoaineina. Biopolttoaineiden kaasutus otetaan käyttöön myös pienissä lämpökeskuksissa. Kaasutusteknologian kehittymisellä voi tulosten mukaan olla kaikkiaan varsin suuri merkitys, kun halutaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti kiinteitä biopolttoaineita niin yhteistuotannossa kuin pienekkoisissa biolämpökeskuksissakin.



Kuva 18. Yhdyskuntien sähkön yhteistuotanto eri skenaarioissa vuonna 2030.

Nopean teknisen kehityksen toteutuessa öljyn käyttöä voidaan vähentää merkittävästi kaukolämpökeskuksissa, jos vanhoja öljykattiloita korvataan uusilla kattiloilla, joissa voidaan käyttää puubiomassasta valmistettua pyrolyysiöljyä. Bioöljyn laaja käyttö edellyttäneekin kuitenkin tuntuvaan kattilatekniikan kehitystä.

Pyrolyysiöljyä arvioidaan tulevaisuudessa voitavan hyödyntää myös moottori-voimalaitoksissa, mutta tulosten mukaan biodieselvoimalaitosten merkitys jää varsin vähäiseksi vuoteen 2030 mennessä. Aurinkolämpöjärjestelmien käyttö kesäaikaisessa kaukolämmön tuotannossa tulee edulliseksi nopean teknisen kehityksen skenaariossa, mikäli päästöjä pitää rajoittaa 30 prosenttia.

5.5 Teollisuuden energiantuotanto ja päästöt

Teollisuuden sähkön ja lämmön yhteistuotannossa metsäteollisuuden energian tuotantolaitokset ovat keskeisessä asemassa niin nykyisin kuin tulevaisuudessa. Noin 80 prosenttia teollisuuden yhteistuotantoon soveltuvasta prosessilämmön tarpeesta on nykyisin metsäteollisuuden piirissä. Tulevaisuudessa mikro-CHP-tekniikat voivat laajentaa yhteistuotantopotentiaalia aina kiinteistöjen lämmityksen kokoluokkaan asti. Niiden taloudellinen potentiaali voidaan kuitenkin arvioida Suomessa hyvin pieneksi suurempien lämmön kulutuskohteiden runsauden ja paremman taloudellisen hyödynnettävyyden takia.

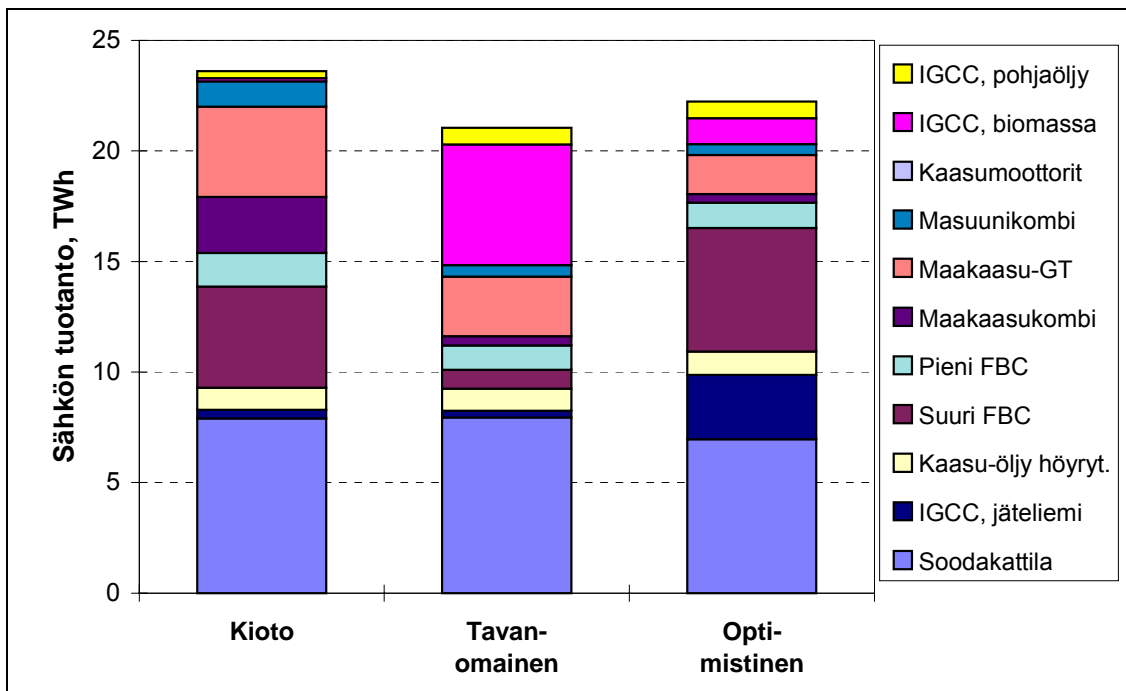
Skenaariolaskelmien mukaan teollisuuden yhteistuotannossa merkittävin yksittäinen tuotantotekniikka on vielä vuonna 2030 höyryturbiinia käyttävä jäteliemi- eli soodakattilalaitos (Kuva 19). Soodakattiloiden sähkön- ja lämmöntuotannon suhdetta (ns. rakennussuhde) voidaan arvioida mukaan lisätä tuntuvasti uusissa laitoksissa nykyiseen verrattuna. Uusien laitosten rakennussuhteeksi on arvioitu nopean teknisen kehityksen tapauksessa vuonna 2030 noin 0,27, kun se on nykyisin vain noin 0,2. Rakennussuhteen nousu lisäisi uusien soodakattilalaitosten sähköntuotantokykyä noin 30 prosenttia.

Toinen lupaava teknologiavaihtoehto mustalipeän entistä tehokkaampaan hyödyntämiseen on edellä mainittu kaasutuskombitekniikka. Jotta kaasuturbiinit pysyisivät pitkäikäisinä ja käyttövarmoina, tuotekaasun puhdistus pitäisi kuitenkin saada niin tehokkaaksi, että kaasuun ei jäisi juuri lainkaan mustalipeän sisältämien keittokemikaalien yhdisteitä. Tehokkaan mutta samalla taloudellisen puhdistuksen kehitystyö on haastava tehtävä. Optimistisessa skenaariossa teknologia saavuttaa täyden kaupallisen kypsyyden noin vuonna 2025, ja se on vuonna 2030 jo merkittävä sähkön- tuotantotekniikka perinteisen soodakattilatekniikan rinnalla.

Mustalipeän lisäksi metsäteollisuus hyödyntää Suomessa eniten myös muita puuperäisiä polttoaineita. Integroitu kaasutuskombiteknologia on tällöinkin lupaavin tapa tehostaa biopolttoaineen käyttöä. Biomassan kaasutusteknologia saa erityisesti optimistisessä tekniikan kehityksen skenaariossa näkyvän roolin vuoteen 2030 mennessä. Sen sijaan öljynjalostuksen pohjaöljyn kaasutusteknologia ja terästeollisuuden masuunikaasua käyttävä kombivoimalaitos tulevat käyttöön suunnilleen samassa laajuudessa kaikissa kolmessa skenaariossa.

Hiilidioksidin erotusteknologian kustannustehokkuutta tarkasteltiin skenaarioissa ainoastaan Raahan terästehtaan prosessikaasujen polton yhteydessä. Mallissa kuvattuun tekniseen ratkaisuun on yhdistetty hiilidioksidin kuljetus ja loppusijoitus Pohjanmeren kaasukentille. Optimistisessä skenaariossa erotus tulee terästehtaalla kannattavaksi vuonna 2020. Jotta tämä teknologia ei kuitenkaan vaikuttaisi tuloksiin kovin paljon, sen hyödyntämispotentiaali rajoitettiin vain pieneen osaan tehtaan hiilidioksidipäästöistä.

Prosessiteollisuudessa on energian tuotannon ohella myös toki joitakin muitakin merkittäviä päästöjä vähentäviä teknologiavaihtoehtoja. Typpihapon valmistuksessa voidaan dityppioksidipäästöjä vähentää tuntuvasti uusien katalyyttisin menetelmin, jotka voivat olla hyvin kustannustehokkaita kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Sellunvalmistuksen meesauuneissa voidaan öljyn käyttöä korvata puubiomassan kaasutuksella. Rakennusaineteollisuudessa voidaan puolestaan perinteisiä raaka-aine- ja energialähteitä korvata entistä enemmän kierrätysmateriaaleilla ja -polttoaineilla. Kaikki nämä teknologiat tulevat tarkastelluissa skenaarioissa käyttöön.

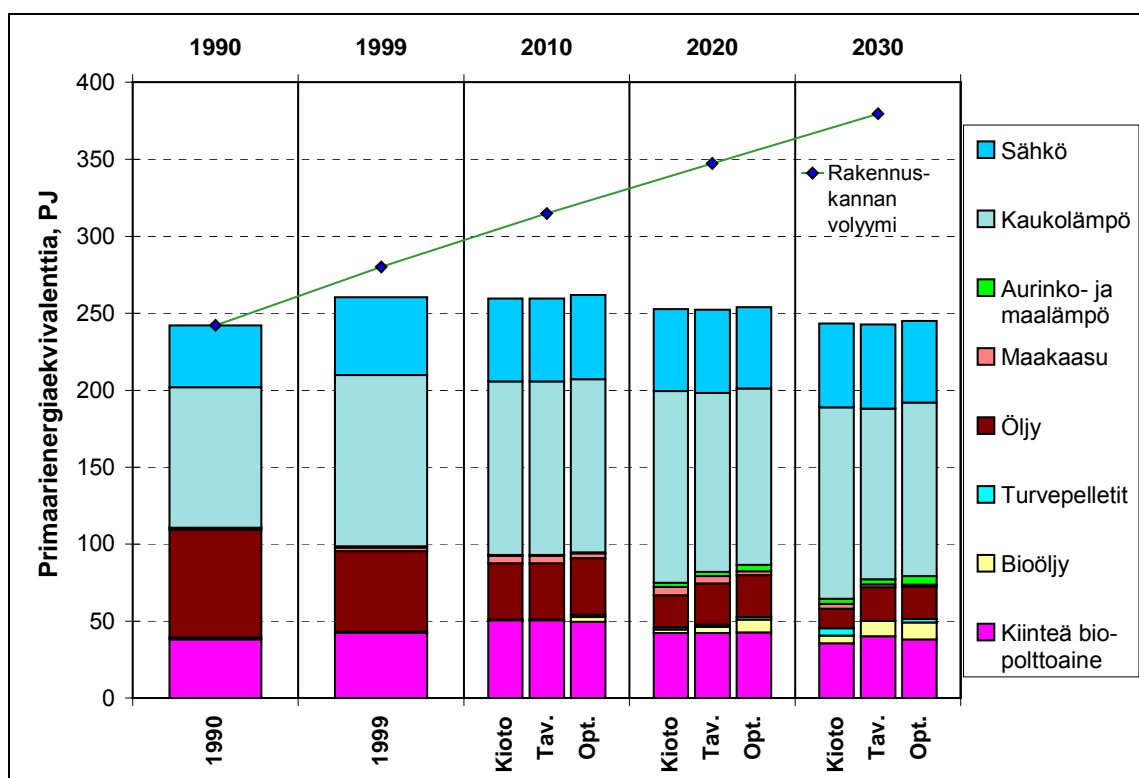


Kuva 19. Teollisuuden sähkön yhteistuotanto eri skenaarioissa vuonna 2030.

5.6 Rakennusten lämmitys ja jäähdytys

Ilmaston lämpenemisen odotetaan vähentävän tuntuvasti lämmitysenergian tarvetta Suomessa. Skenaariolaskelmissa käytettiin arviota, jonka mukaan vähennys on jopa noin 12 prosenttia vuoteen 2030 mennessä (Tammelin et al. 2002). Samaan aikaan Suomessa otetaan ilmastostrategian mukaisesti myös käyttöön entistä tiukempia rakennusmääräyksiä sekä tuetaan korjausrakentamista (KTM 2001). Kaikkien näiden tekijöiden ansiosta sekä uusien että vanhojen rakennusten ominaiskulutukset pienenevät. Vaikka sekä asuin- että palvelurakennuskannan oletetaan kasvavan merkittävästi, rakennusten lämmitysenergian kokonaiskulutus kääntyy skenaariotulosten mukaan laskuun (Kuva 20).

Oheislämpöjen hyödyntämisen ansiosta ominaiskulutusten pieneminen vähentää lämmityslaitteilla tuotettavan lämmön määrää suhteellisesti vielä enemmän. Kiinteiden kustannusten suuren osuuden vuoksi lämmityksen yksikkökustannukset kuitenkin samalla nousevat. Lämmönkulutuksen huipputeho ei myöskään vähene yhtä paljon kuin lämmityslaitteilla tuotettavan lämmön vuotuinen tarve. Sekä pienemmät yksikkökoot että huipunkäyttöajan pieneminen merkitsevät lämmityslaitteiden investointikustannusten nousua tuotettua lämpöenergiayksikköä kohti. Pääomavalttaisten lämmitystekniikoiden markkina-asema siten heikkenee ominaiskulutusten pienentyessä.



Kuva 20. Lämmityksen energialähteiden kulutus primaarienergiaekvivalenteina eri skenaarioissa vuosina 1990–2030.

Tärkeimmät lämmitysteknologiat voidaan luokitella kauko-, öljy-, sähkö- ja puulämmitykseen. Skenaariotulosten mukaan niin kauko- ja sähkölämmityksen kuin puuperäisten polttoaineiden markkinaosuudet kasvavat hieman sekä tavanomaisessa että optimistisessä skenaariossa. Puupolttoaineisiin luetaan tällöin perinteisten puupolttoaineiden lisäksi pyrolyysiöljy sekä puupelletit, jotka optimisessa skenaariossa vahvistavat merkittävästi biopolttoaineiden markkinaosuutta. Tavanomainen öljylämmitys on tulosten mukaan lämmitysmuotojen markkinaosuuksissa selvä häviäjä. Erityisesti pyrolyysiöljykattiloiden, mutta myös muun muassa automaattisyöttöisten stoker-kattiloiden ja pellettitakkojen tulevalla kehitystyöllä on merkitystä mineraaliöljyn käytön ja siitä aiheutuvien päästöjen vähentämisessä.

Optimistisessä skenaariossa myös aurinkolämmitys pääsee verraten laajasti markkinoille vuoteen 2030 mennessä, jolloin aurinkolämmön hyödyntäminen nousee noin 500 gigawattituntiin. Pimeän talven vuoksi kiinteistökohtaisella aurinkolämmityksellä on Suomessa edullista tuottaa lähinnä lämmintä käyttövoimaa. Tarkastelluissa skenaarioissa otettiin huomioon kuitenkin myös aurinkolämmön hyödyntäminen kesäaikaiseen kaukolämmitykseen.

Lämpöpumpputeknologioista ilmalämpöpumppujen markkinat kasvavat kaikissa skenaarioissa maalämpöpumppuja nopeammin. Tähän vaikuttaa osaltaan edellä mainittu pääomakustannusten merkityksen korostuminen lämmityskustannuksissa, joka heikentää varsin kalliiden porakaivoon perustuvien lämpöpumppujärjestelmien kilpailukykyä. Toisaalta on huomattava, että lämpöpumppujärjestelmille ei laadittu tässä tarkastelussa lainkaan optimistista teknologiaskenaariota, sillä Climtech-ohjelma ei tuottanut sitä varten riittävän yksityiskohtaista tietoa.

5.7 Liikenteen energian käyttö

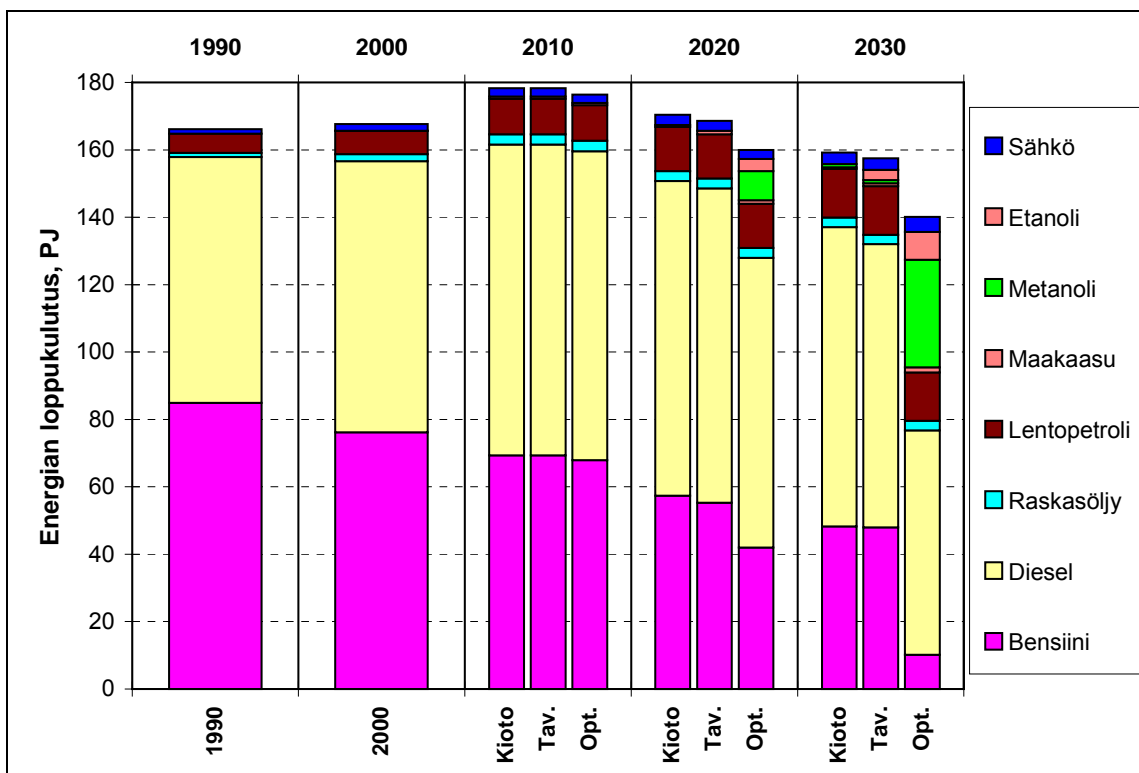
Liikenteen sektorilla kasvihuonekaasujen kehitykseen voivat vaikuttaa merkittävästi paitsi teknologian kehittyminen myös eri liikennemuotojen markkinaosuudet sekä muutokset yhdyskuntarakenteessa. Skenaariotarkasteluissa sekä liikennemuotojen osuuksien että yhdyskuntarakenteen kehittymisestä käytettiin kuitenkin kiinteitä skenaarioita, joten skenaariot eroavat ainoastaan kunkin liikennemuodon sisäisen teknologian kehityksen ja markkinaosuuksien osalta.

Kaikissa skenaarioissa oletettiin tavanomaisen ottomoottoritekniikan kehittyvän lähes EU:n autonvalmistajien kanssa tekemän sopimuksen mukaisesti. Uusien henkilöautojen keskimääräisen polttoaineenkulutuksen alenemisen tasolle 5 l/100 km oletettiin kuitenkin viivästyvän noin vuoteen 2014 saakka, sillä tällä tavoin voitiin ottaa huomioon todennäköinen ajosuoritteiden määrän nousu polttoainekustannusten pienentyessä (ns. rebound-vaikutus).

Optimistisessa skenaariossa liikenteen energiankäytössä tapahtuu tavanomaisen tekniikan paranemisen lisäksi hyvin näkyviä teknologisia muutoksia (Kuva 21). Lähes koko henkilöautokannassa valtateknologia vaihtuu bensiinikäyttöisestä ottomoottorista polttokennopohjaiseen ajoneuvotekniikkaan. Myös hybridi- ja sähköautoja tulee runsaasti markkinoille. Sähköautojen kaupallinen kilpailukyky keskittyy kuitenkin henkilöautojen sijasta taajamien pakettiautokuljetuksiin.

Polttokennoautojen energialähteeksi oletettiin skenaarioissa metanoli. Biomassasta valmistetun metanolin kalleuden vuoksi metanoli oletettiin valmistettavan maakaasusta. Valmistukseen käytetyn maakaasun hiilisisältö on laskelmissa otettu huomioon Suomen kasvihuonekaasujen päästöissä, vaikka käytännössä metanolia ei ehkä valmistettaisi Suomessa. Maakaasun käyttö raaka-aineena luonnollisesti pienentää polttokennoautojen käyttöönotolla aikaan saatavaa päästöjen vähennystä. Päästövaikutus on vuosina 2020–2030 vain 5–10 % tavanomaisia bensiinikäyttöisiä henkilöautoja pienempi.

Tavanomaistenkin liikennepolttoaineiden kasvihuonekaasuvaikutusta voidaan pienentää lisäämällä polttoaineisiin metanoli- tai etanolipohjaisia biokomponentteja. Skenaarioissa biokomponentteja oletettiin käytettävän laajemmin ainoastaan dieselöljyssä, sillä bensiinikäyttöiset ajoneuvoteknologiat väistyvät optimistisessa skenaariossa jo muutoinkin lähes kokonaan polttokennoajoneuvojen tieltä. Optimistisessa skenaariossa biokomponenttien osuus nousee noin 15 %:iin dieselöljyn kokonaiskulutuksesta.



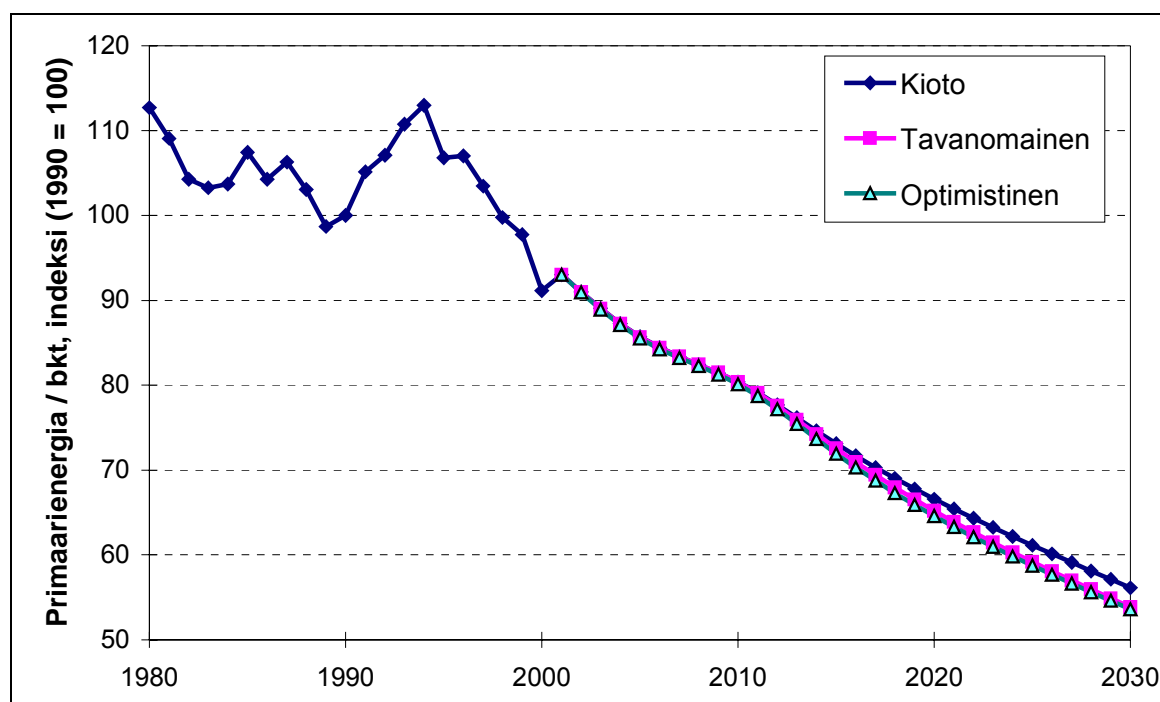
Kuva 21. Liikenteen energian loppukäyttö eri skenaarioissa vuosina 1990–2030.

5.8 Energian käytön tehostuminen

Climtech-ohjelmassa tehtiin joitakin merkittäviä uusia energiankäytön tehostamiseen liittyviä selvityksiä. Kotitalouksien ja toimistotilojen laitesähkön käytön selvityksessä löydettiin edullisia ja merkittäviä teknisiä tehostustoimia erityisesti kotitalouksien valaistuksessa ja kulutuselektroniikan käytössä. Mallilaskelmien tulokset vahvistavat tehostuspotentiaalin edullisuuden. Myös toimistotilojen laitesähkön kulutuksen säästöpotentiaali arvioitiin hyvin suureksi, mutta valitettavasti selvityksessä ei esitetty arvioita sen kustannuksista.

Metsäteollisuuden mekaanisen massan valmistuksen tehostamista käsittelevässä selvityksessä kuvattiin kaksi merkittävää teknologiaa, joilla voidaan vähentää sähkön kulutusta hierteen valmistuksessa. Kumpikin tekniikka oli mukana skenaariotarkasteluissa, ja optimistisessa skenaariossa molemmat tulivat laajaan käyttöön vuoteen 2030 mennessä. Tekniikoilla saavutettu sähkön käytön tehostuminen on huomattava, noin 0,5 TWh. Tulokset antavat siten pontta ainakin näiden kahden kotimaisen tehostustekniikan jatkokehitykseen.

Koko energiajärjestelmän energian käytön tehostumista voidaan havainnollistaa primaarienergian kokonaiskäytön ja bruttokansantuotteen suhteen avulla. Kuvassa 22 on esitetty tämän suhteen kehitys tarkastelluissa skenaarioissa. Kansantalouden keskimääräinen energiaintensiivisyyden väheneminen on vajaat 1,8 % vuodessa tarkastel-



Kuva 22. Energian kokonaiskulutuksen ja bruttokansantuotteen suhde eri skenaarioissa.

taessa sekä ajanjaksoa 1995–2010 että jaksoa 2000–2030. Skenaarioiden väliset erot ovat varsin pieniä, mikä johtuu suurelta osin siitä, että energian loppukäytön tehostustoimia käsiteltiin verrattain kapeasti Climtech-ohjelman selvityksissä.

5.9 Rikin- ja typenoksidipäästöjen sekä hiukkaspäästöjen kehitys

Energiajärjestelmämallin avulla tarkasteltiin kasvihuonekaasujen päästöjen lisäksi myös muiden haitallisten ilmapäästöjen kehitystä Suomessa. Tarkasteluun otettiin mukaan rikin- ja typenoksidipäästöt sekä hiukkaspäästöt. Näitä päästöjä koskevia kehitysarvioita sekä skenaariotuloksia on raportoitu yksityiskohtaisesti tämän osahankkeen erillisessä loppuraportissa (Syri & Lehtilä 2003). Tässä esitellään lyhyesti vain työn joitakin keskeisiä tuloksia.

Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen vähentää skenaariotulosten mukaan myös energian tuotannon ja teollisuusprosessien rikkipäästöjä. Kun päästöjen vähennystavoite on 20 % vuoden 1990 tasosta, rikkipäästöt vähenevät skenaarioissa 11–16 %. Vähene mistä tapahtuu etupäässä erillisessä sähköntuotannossa ja yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa. Tärkeimpänä taustatekijänä on hiilen ja turpeen käytön väheneminen.

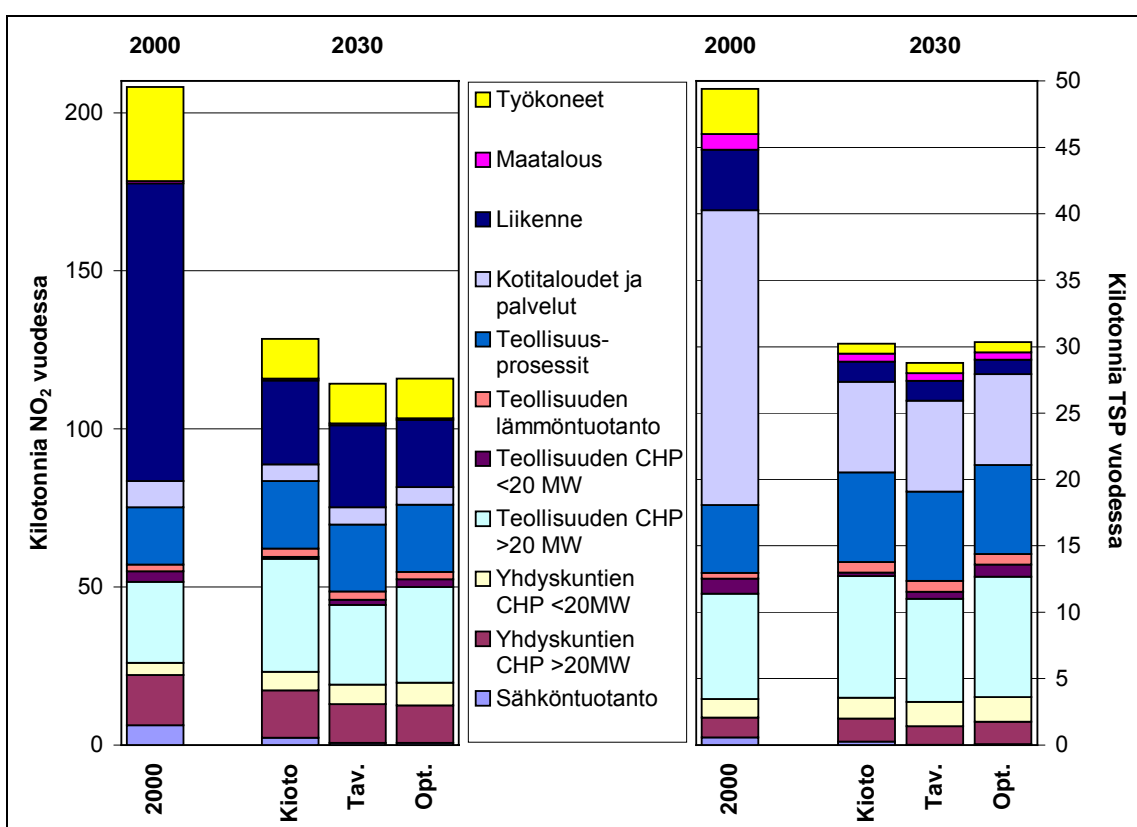
Typenoksidipäästöjen tulevaisuuden kehitys laskettiin vuoteen 2030 asti olettaen, että päästönormit ja rajoitustekniikat säilyvät nykyisin tiedossa olevalla tasolla. Liikenteen osalta huomioitiin myös tiedossa olevat tulevaisuuden tekniikoiden ominaisuudet ja päästömääräykset. Kuvassa 23 on esitetty Suomen typen oksidien päästöjen kehitys v. 2000–2030 tarkastelluissa skenaarioissa.

Kasvihuonekaasujen vähentäminen 20 % alentaisi myös typen oksidien päästöjä 8–9 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna tilanteeseen, jossa vain Kioton pöytäkirja olisi toteutettu. Vähennämä johtuu pääosin erillisen sähköntuotannon ja suuren mittakaavan yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon päästöjen laskusta verrattuna Kioto-skenaarioon.

Optimistisessa skenaariossa myös liikenteen NO_x-päästöt vähenevät merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Kioto-skenaarioon verrattuna vähennys on 18 %. Tämä johtuu voimakkaasta siirtymästä konventionaalisista henkilöautoista hybridimoottoreihin ja polttokennoihin vuodesta 2020 alkaen. Toinen merkittävä kokonaispäästöjä vähentävä tekijä on biokomponenttien käyttöönotto raskaan tieliikenteen polttoaineissa. Kaikkiaan liikenteen ja työkoneiden päästöjen vähennys on vuoteen 2030 mennessä eri skenaarioissa 68–73 % vuoden 2000 tasoon verrattuna.

Kuvassa 23 on esitetty myös Suomen hiukkaspäästöjen (TSP) kehitys v. 2000–2030 tarkastelluissa skenaarioissa. Hiukkaspäästöt vähenevät vuoteen 2030 mennessä kaikissa skenaarioissa. Tämä johtuu etupäässä oletetuista pienpoltossa tapahtuvista muutoksista, mutta myös liikenteessä päästöt vähenevät merkittävästi. Liikenteen hiukkaspäästöt vähenevät vuoteen 2030 mennessä kaikissa skenaarioissa 67–76 % vuoden 2000 tasosta, mikä johtuu lähinnä kiristyvistä EU-normeista.

Työssä arvioitiin alustavasti myös hiukkaspäästöjen suhteellisia vähentämispotentiaaleja keskeisimmillä hiukkaspäästöjä tuottavilla sektoreilla Suomessa. Kuvassa 24 on esitetty arvio vähennyspotentiaalista vuoteen 2030 mennessä nykyisin käytössä olevin tekniikoin optimistisessa teknologisen kehityksen skenaariossa. Suurille polttolaitoksille tehtiin arviot teoreettisesta päästöjen vähentämispotentiaalista nykyisin käytössä olevin teknisin keinoin olettamalla laitteiden optimaalinen toiminta nykyisellä erotustehokkuudella. Liikenteen osalta tällä hetkellä päätettyjen moottoritekniikoita koskevien päästövaatimusten sekä uusien teknologioiden arvioidut vaikutukset otettiin huomioon. Pienpoltossa oletettiin, että kotitalouksien, kesämökkien ja kiinteistöjen lämmityksen tulisijat ja kattilat uusitaan 20–40 vuoden välein ja että kaikki käyttöön otettavat kattilat ja tulisijat edustavat tällä hetkellä polttoteknisillä keinoilla saavutettavia päästötasoja.

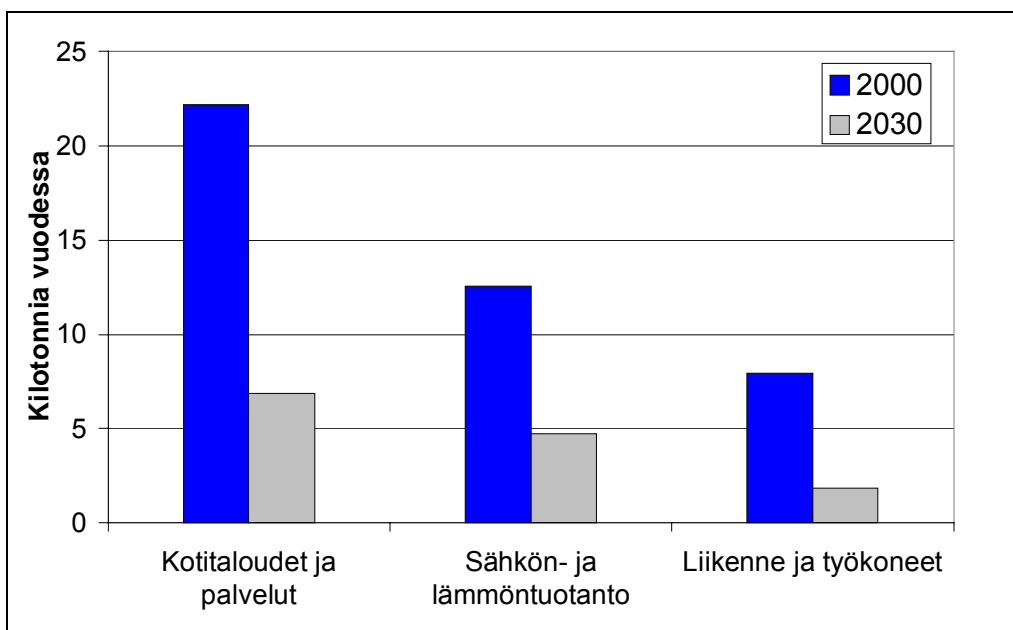


Kuva 23. Energiantuotannon ja teollisuusprosessien typenoksidi- (vasemmalla) ja hiukkaspäästöt (oikealla) vuonna 2000 sekä eri skenaarioissa vuonna 2030.

Mallilaskelmat indikoivat, että Suomen hiukkaspäästöjä voidaan vähentää vuoteen 2030 mennessä, mikäli kotitalouksien, kesämökkien ja kiinteistöjen lämmityksen tulisijoja ja kattiloita uusitaan nykyaikaisen tekniikan mukaisilla ratkaisuilla ja mikäli tulisijojen oikeaan käyttöön panostetaan. 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 teknologiset muutokset ovat kuitenkin luonteeltaan hitaampia ja vaikeammin säädeltävissä pelkästään kotimaisilla toimilla. Energiantuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa merkittävä osa hiukkaspäästöistä aiheutuu häiriötilanteista ja puhdistuslaitteistojen epäoptimaalisesta toiminnasta erityisesti pienempien kokoluokkien laitoksissa. Jos laitteistojen toiminta saataisiin vastaamaan nykyisin käytössä olevilla vähennystekniikoilla parhaita saavutettavissa olevia päästötasoja, päästöt vähenisivät merkittävästi.

Useimmat kasvihuonekaasujen päästöjä Suomessa vähentävät teknologiset ratkaisut alentaisivat siis tulosten mukaan myös muiden ilmansaasteiden päästöjä verrattuna nykytilanteeseen. Tulokset ovat samansuuntaisia aiempien aiheesta tehtyjen selvitysten kanssa (esim. Syri et al. 2002). Energiankäyttöä tehostavilla toimilla on välillisiä myönteisiä vaikutuksia muiden ilmansaasteiden päästöihin niin kauan kuin energiaa tuotetaan päästöjä aiheuttavilla tuotantomuodoilla.

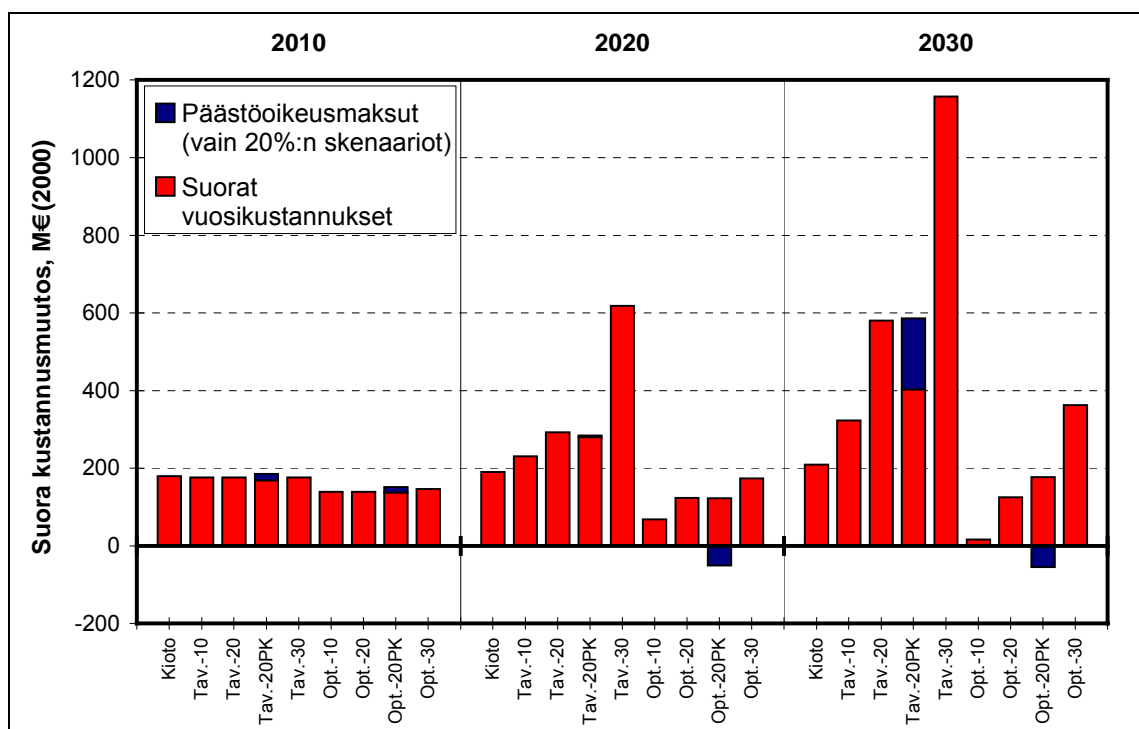


Kuva 24. Eri sektorien arvioitu hiukkaspäästöjen (TSP) vähennyspotentiaali Suomessa vuosina 2000- 2030 optimistisessä teknologiaskenaariossa.

5.10 Päästöjen rajoittamisen kustannukset

Skenaariotarkastelujen talousvaikutustulosten mukaan teknologian kehitys vaikuttaa merkittävästi päästöjen rajoittamisen aiheuttamiin suoriin kustannuksiin. Kuvassa 25 on esitetty suorat vuosittaiset lisäkustannukset kussakin tarkastellussa skenaariossa verrattuna perusuraskenaarioon. Suorat kustannukset sisältävät kaikki energiajärjestelmässä kuvattujen tuotantolaitosten ja käyttötekniikoiden investointi-, käyttö-, polttoaine- ja raaka-ainekustannukset. Vuosittaiset lisäkustannukset ovat tavanomaisen kehityksen skenaariossa vuonna 2030 lähes 500 miljoonaa euroa suuremmat kuin optimististen kehitysarvioiden skenaariossa, kun päästöjen vähennystavoitteeksi oletetaan 20 % vuodesta 1990.

Tiukemmilla päästötavoitteilla skenaarioiden kustannusero kasvaa edelleen. Päästöjen vähennystavoitteen ollessa 30 % optimistisen skenaarion vuosittainen kustannussäästö on jo noin 800 M€ vuonna 2030. Skenaarioiden väliset erot voidaan tulkita niin, että mitä aikaisemmin puhdasta teknologiaa aletaan kehittää ja ottaa käyttöön, sitä suuremaksi kasvaa vuosien mittaan kaikkiaan saatava kumulatiivinen kustannussäästö. Skenaariotarkasteluissa keskeisten uusien tekniikoiden käyttöönoton laajuudessa oli pääosin vain aste-eroja tavanomaisen ja optimistisen skenaarion välillä, mikä osaltaan vahvistaa tuloksia lupaavimpien tekniikoiden merkityksestä.



Kuva 25. Päästöjen rajoittamisen suorat vuosittaiset kustannusvaikutukset eri skenaarioissa vuosina 2010, 2020 ja 2030 verrattuna perusuraan.

Päästökaupan vaikutuksia tarkasteltiin sekä tavanomaisen että optimististen arvioiden mukaisessa tekniikan kehityksen skenaariossa, kun päästöjen vähennystavoite on 20 %. Päästöoikeuksien hinnaksi oletettiin 10 euroa tonnilta hiilidioksidia vuonna 2010 ja vastaavasti 30 euroa vuonna 2030. Tulosten mukaan suomalaisten yritysten on vuonna 2010 kummankin skenaarion mukaan edullista ostaa 1,5–2 milj. tonnia päästöoikeuksia näillä hinnoilla. Jos hinta nostettiin 15 euroon, päästöoikeuksien kauppa kääntyi kuitenkin jo toiseen suuntaan.

Vuoden 2020 tilanteessa, jossa päästöoikeuksien hinta on 20 €/tonni (CO₂), Suomen päästöoikeuksien kauppataase olisi tavanomaisen skenaarion tapauksessa suunnilleen tasapainossa, mutta optimistisessä skenaariossa päästöoikeuksia kannattaisi ryhtyä myymään muutaman miljoonan tonnin verran. Vuonna 2030 skenaarioiden erot vielä korostuvat, sillä tällöin tavanomaisessa skenaariossa päästöoikeuksia kannattaisi ostaa melko paljon, noin 6 miljoonaa tonnia (CO₂). Sen sijaan optimistisessä skenaariossa oikeuksia olisi edelleen edullista myydä. Teknologian nopea kehitys luo mahdollisuuksia myydä päästöoikeuksia niiden ostamisen sijasta, joten tekniikan kehitystyöstä voidaan saada tätä kautta selvää lisähyötyä.

Päästökaupan vaikutukset päästöjen rajoittamisen suoriin kustannuksiin ovat kuitenkin tulosten mukaan melko pienet. Kauppa vähentää periaatteessa kaikkien osapuolten kustannuksia. Laskentamallissa kaupasta aiheutuu kuitenkin vuoden 2010 tilanteessa tulosten mukaan hieman lisäkustannuksia. Tämä johtuu lähinnä oletetusta päästökaupan aiheuttamasta tuontisähkön hinnan noususta. Tuontisähkön hinnan oletettiin nousevan päästökaupan seurauksena vastaavan sähkömäärän tuottamiseen tarvittavan maakaasulauhdevoiman hiilidioksidipäästöjen hinnan verran.

6. Teknologian potentiaali ja kustannustehokkuus

Skenaariotarkastelun tulosten pohjalta voidaan arvioida eri teknologioiden merkitystä Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Taulukossa 1 on esitetty arvioita teknologisten vaihtoehtojen merkityksestä sähkön ja lämmön tuotannossa. Kiinteistöjen lämmitysteknologiaa käsitellään kuitenkin vasta jäljempänä taulukossa 2.

Taulukoissa esitetyt arviot perustuvat pääosin tehtyjen skenaariolaskelmien tuloksiin mutta myös mm. uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman taustaselvityksiin (Helynen et al. 1999) sekä tekijöiden omiin arvioihin. Tekniikoiden merkitystä kasvihuonekaasujen päästöjen kannalta on arvioitu karkeasti kunkin teknologiaryhmän potentiaalin prosentuaalisena vaikutuksena kokonaispäästöihin, kun vertailukohtana on perusuraskenaarion mukainen kehitysarvio. Päästövaikutukset eivät kuitenkaan ole suoraan laskettavissa yhteen, mikä on huomattava erityisesti vuoden 2030 arvioissa.

Taulukko 1. Energiantuotantoteknologioiden merkitys sähkön- ja lämmöntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä Suomessa kehityksen perusuraan verrattuna.

	Merkitys vuonna 2010	Merkitys vuonna 2030
Poltettavat energialähteet		
Sähköntuotannon hyötysuhteen nostaminen	■	■■
Yhteistuotannon osuuden lisääminen	■	■
Yhteistuotannon rakennusasteen nosto	■■	■■
Kiinteiden polttoaineiden kaasutus	■■	■■■
Verkkoon kytketyt polttokennot	0	■
Maakaasukombi- ja moottoritekniikat	■■■	■■
Polttotekniikat kiinteille bio- ja REF-polttoaineille	■■■	■■■
Polttotekniikat neste- ja kaasumaisille biopolttoaineille	■	■■
Hiilidioksidin poisto savukaasuista ja loppusijoitus	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 %)

Polttoaineisiin perustuvan sähköntuotannon kokonaishyötysuhde on Suomessa korkea (yli 60 %), mikä aiheutuu laajasta yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP) hyödyntämisestä. Vuonna 2001 noin 36 % koko sähköntuotannosta ja yli 70 % poltettaviin energialähteisiin perustuvasta sähköntuotannosta perustui yhteistuotantoon (Tilastokeskus 2002). Erilliseen sähkön- ja lämmöntuotantoon verrattuna yhteistuotannossa CO₂-päästöt ovat jopa 35 % alhaisemmat. Yhteistuotantoon parhaiten soveltuvia suuria lämpökuormia on Suomessa poikkeuksellisen runsaasti sekä prosessiteollisuuden että taajamiin rakennettujen kaukolämpöverkostojen ansiosta.

Yhteistuotannon osuuden lisääminen vielä huomattavasti nykyistä suuremmaksi on mahdollista sekä hyödyntämällä yhä pienempiä lämpökuormia että nostamalla yhteistuotannon ns. rakennussuhdetta eli sähkön ja lämmön tuotannon suhdetta. Rakennussuhdetta voidaan nostaa esimerkiksi maakaasu- ja kaasutuskombiteknologian (IGCC) avulla. Rakennusasteen nosto voi olla merkittävä keino vaikuttaa päästöihin jo vuoteen 2010 mennessä. Kehitteillä olevista tekniikoista varsinkin kiinteiden polttoaineiden kaasutus ja polttokennot voivat lisätä yhteistuotannon potentiaalia pitkällä aikavälillä merkittävästi. Verraten suuren ydin- ja vesivoimatuotannon osuuden ja kasvavan tuulivoimatuotannon vuoksi yhteistuotannon voimakas lisääminen nykyisestä ei kuitenkaan ole skenaariotulosten mukaan enää edullista.

Biopolttoaineiden käytön lisääminen on merkittävimpiä keinoja päästöjen vähentämiseksi Suomen energiantuotannossa. Vaikka Suomi on jo tällä hetkellä johtavia maita maailmassa bioenergian hyödyntämisessä, mahdollisuudet merkittävään käytön lisäykseen ovat skenaariotulosten mukaan olemassa suunnilleen uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman mukaisesti. Merkittävin teknologia biopolttoaineiden hyödyntämisessä on nykyisin leijukerrospoltto, mutta tulevaisuudessa kaasutusteknologiat nousevat tulosten mukaan merkittävään rooliin.

Myös maakaasu on päästöjen vähentämisen kannalta merkittävä polttoaine. Sen CO₂-päästöt ovat noin 40 % pienemmät kuin kivihieillä ja noin 25 % pienemmät kuin öljytuotteilla. Suomessa uuden ydinvoimalaitoksen rakentaminen rajoittaa lyhyellä aikavälillä jonkin verran maakaasun potentiaalia sähkön tuotannossa. Toisaalta taas pidemmällä aikavälillä maakaasun merkitys päästöjen rajoittamisessa vähenee, koska suurin osa esim. kivihielestä on jo korvattu muilla polttoaineilla. Vuonna 2001 maakaasun osuus primaarienergiasta oli noin 11 %.

Hiilidioksidin poisto savukaasuista voi tulla tulosten mukaan Suomessakin edulliseksi päästöjen vähennysteknologiaksi ainakin joissakin suurimmissa päästölähteissä. Tällainen lähde on mm. Raahan rauta- ja terästehdas, jossa sekä päästöjen volyyymi että niiden pitoisuus savukaasuissa ovat Suomen oloissa hyvin suuria.

Minivesivoiman arvioitu rakentamispotentiaali, noin 1 TWh vuoteen 2030 mennessä, kannattaa tulosten mukaan pyrkiä hyödyntämään mahdollisimman hyvin. Tuulivoima on kuitenkin päästöjen vähennyspotentiaaliltaan vielä paljon merkittävämpi teknologia. Tulosten mukaan tuulivoiman tuotantoa on edullista lisätä 20 %:n vähennysskenaariossa peräti 7–12,5 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä. Aurinkoenergia saa tulosten mukaan näkyvän roolin vasta vuoden 2030 jälkeen, mutta sen merkitys kasvaa nopeammin, jos päästötavoitteet tulevat hyvin tiukoiksi.

Arvioita energiankäyttöteknologioiden ja niihin liittyvien keinojen merkityksestä päästöjen vähentämisessä on esitelty taulukossa 2. Eri keinojen potentiaalit on arvioitu vertaamalla niitä ns. perusuran mukaiseen kehitykseen, joka sisältää jo jonkin verran energian loppukäyttöä tehostavia toimenpiteitä. Prosentuaaliset toimenpiteiden vaikutukset on arvioitu pitkälle aikavälille, ja niiden tarkoitus on antaa karkea kuva esimerkiksi energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksista. Yleisesti tietyn energiankäyttöä tehostavan toimenpiteen merkitys ei useinkaan ole kovin suuri, mutta monien eri keinojen yhteisvaikutus voi olla hyvinkin merkittävä.

Suomessa teollisuus kuluttaa noin puolet kaikesta energiasta, ja aiheuttaa siten joko suoraan tai välillisesti suuren osan energiaperäisistä CO₂-päästöistä. Teollisuuden keinot energiankäytöstä aiheutuvien päästöjen vähentämiseen ovat energiatehokkuuden parantaminen, polttoaineiden vaihto, uudet teknologiat ja prosessit, materiaalien korvaaminen ja kierrätys. Lyhyellä aikavälillä merkittävimmät keinot ovat energiatehokkuuden parantaminen ottamalla käyttöön tehokkainta kaupallista teknologiaa normaalin laitteiden uudistamisen yhteydessä ja prosesseissa suoraan käytettävän polttoaineen vaihto.

Rakennusten lämmityksessä merkittävimpiä keinoja päästöjen vähentämiseen ovat eristyksen ja ilmanvaihdon parantaminen sekä uudet lämmityksen energialähteet ja kehittyneet lämmitysjärjestelmät. Huomattavaa potentiaalia tarjoavat erityisesti jalostettujen biopolttoaineiden käytön lisääminen ja erilaiset lämpöpumppujärjestelmät. Pidemmällä tähtäimellä myös aurinkoenergiasovelluksilla voi olla huomattava vaikutus. Tehokkaammilla ja älykkäämmillä sähkölaitteilla voidaan vähentää laitesähkön kulu- tusta kotitalouksissa ja palvelurakennuksissa.

Liikenteessä lyhyellä aikavälillä merkittävimpiä keinoja päästöjen vähentämisen kannalta ovat polttomoottoritekniikan kehittäminen ja kuljetusvälineen valintaan vaikuttaminen. Pidemmällä aikavälillä kehittyneet teknologiat ja polttoaineet, kuten biopolttonesteet sekä sähkö- ja polttokennoautot, vaikuttavat merkittävästi liikenteen päästöjen vähenemiseen. Myös yhdyskuntarakenteen tiivistäminen vähentäisi liikenteen päästöjä pidemmällä aikavälillä. Liikenneteknologian kehitykseen voidaan Suomessa valitettavasti vaikuttaa varsin vähän. Kehittämällä öljynjalostuksen yhteydessä moottoripoltt- oaineiden biokomponenttien käyttöominaisuuksia voitaneen kuitenkin edistää biopoltt- oaineiden käyttöönottoa myös tieliikenteessä.

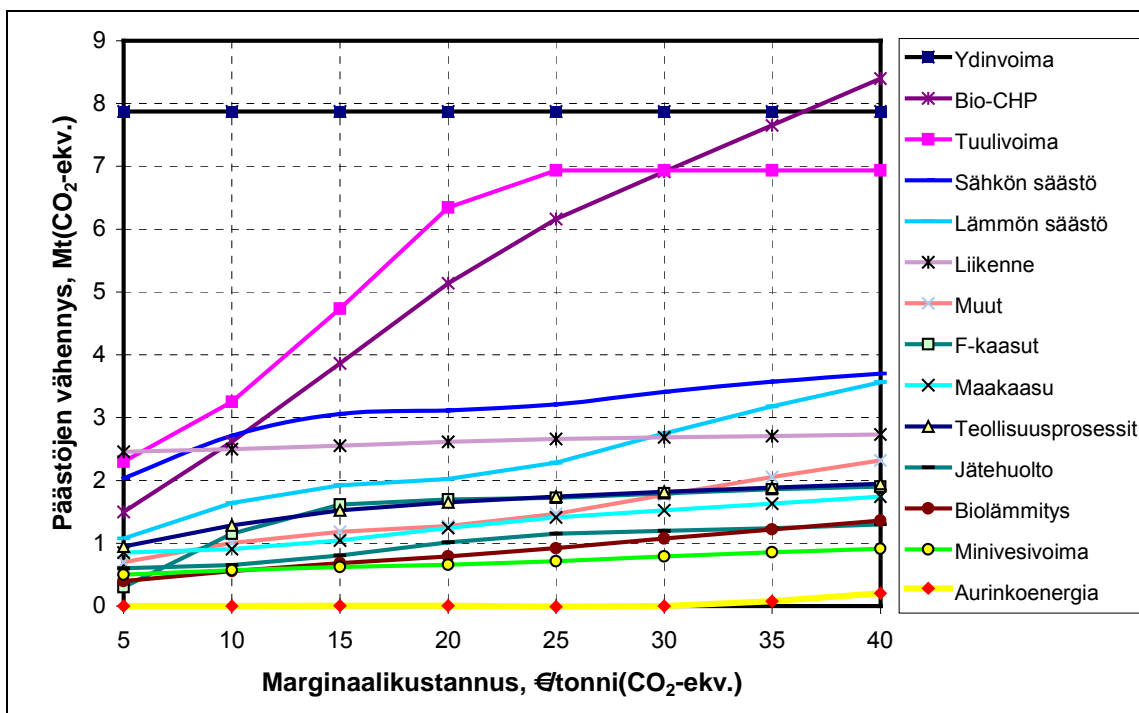
Taulukko 2. Energian loppukäyttöä tehostavien keinojen merkitys kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä Suomessa Climtech-skenaarioiden tulosten perusteella.

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

■ = pieni (< 1 %), ■■ = kohtalainen (1–2 %),
■■■ = huomattava (2–5 %), ■■■■ = suuri (> 5 %)

Eri tekniikoiden kustannustehokkuutta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta on havainnollistettu taulukoissa 3 ja 4. Taulukkojen kustannustehokkuusarviot perustuvat skenaariotarkastelun teknologiakohtaisiin tuloksiin. Indikaattori vähennyspotentiaalın suuruudesta kuvaa karkeasti teknologian käytön lisäyksen tuottaman päästöjen vähennyksen merkitystä Suomen kokonaispäästöjen kannalta, kun vertailukohtana on teknologian käyttö perusraskenaariossa.


Teknologian potentiaalın ja kustannustehokkuuden suhdetta voidaan pyrkiä havainnollistamaan myös esittämällä eri teknologiaryhmien osuuksia saavutetusta kokonaispäästöjen vähennyksestä. Kun osuudet arvioidaan sarjassa skenaarioita, joissa hiilidioksidiveron tasoa muutetaan, saadaan käyrät, jotka kuvaavat kullakin teknologialla saavutettuja päästöjen vähennyksiä marginaalikustannusten funktiona. Kuvassa 26 on esitetty tällainen havainnollistus optimistisessä tekniikan kehityksen skenaarioperheessä, kun tarkastellaan päästöjen vähennyksiä vuonna 2030. Kuvan yksittäisten vähennyskäyrien summasta muodostuu myös kokonaisvähennysten käyrä, joka vastaa kullakin marginaalikustannustasolla saavutettavaa päästöjen kokonaisvähennystä. On kuitenkin huomattava, että kuvassa esitettyä päästöjen vähennysten jakautumista eri teknologiaryhmille ei voida johtaa suoraan mallin tuloksista, vaan jakauma on laskettava käyttäen jonkinlaisia keskimääräisarvioita siitä, minkälaista tuotantoa eri teknologiat korvaavat.



Kuva 26. Eri teknologiaryhmillä saavutettavat päästöjen vähennykset marginaalikustannusten funktiona optimistisessä skenaarioperheessä vuonna 2030.

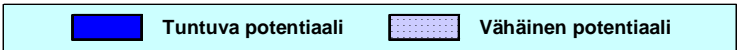
Taulukko 3. Eräiden teknologiaryhmien kustannustehokkuus kasvihuonekaasujen vähentämisessä vuonna 2010 Climtech-skenaarioiden tulosten mukaan.

Vuosi 2010	Tavanomainen teknologiaskenaario					Optimistinen teknologiaskenaario				
	kustannustehokkuus, €/t(CO ₂)					kustannustehokkuus, €/t(CO ₂)				
Tekniikka	alle 10	10–20	20–30	30–100	yli 100	alle 10	10–20	20–30	30–100	yli 100
Kiinteän biomassan kattilatekniikat										
Biomassan kaasutuspoltto										
Biomassan integroitu kaasutus										
Jätteen energiakäyttö										
Pyrolyysiöljy aluelämmityksessä										
Tuulivoima, rannikko										
Tuulivoima, meri/tunturi										
Integroitu aurinkosähkö										
Aurinkolämmitys										
Kiinteistölämpöpumput										
Pyrolyysiöljy kiinteistökattiloissa										
Kotitaloudet: valaistus, viihde-elektroniikka										
Kotitaloudet: muut laitteet jne.										
Entsyymiavusteinen hierteen valmistus										
Biopulping-hierremassa										
N ₂ O:n hajoitus typpihapon valmistuksessa										
CO ₂ :n erotus masuunikombissa										
Kaatopaikkakaasun talteenotto										
F-kaasut: vuotojen vähentäminen jne.										
F-kaasut: korvaavat tekniikat & kylmäaineet										



Taulukko 4. Eräiden teknologiaryhmien kustannustehokkuus kasvihuonekaasujen vähentämisessä vuonna 2030 Climtech-skenaarioiden tulosten mukaan.

Vuosi 2030	Tavanomainen teknologiaskenaario					Optimistinen teknologiaskenaario				
	kustannustehokkuus, €/t(CO ₂)					kustannustehokkuus, €/t(CO ₂)				
Tekniikka	alle 10	10–20	20–30	30–100	yli 100	alle 10	10–20	20–30	30–100	yli 100
Kiinteän biomassan kattilatekniikat										
Biomassan kaasutuspoltto										
Biomassan integroitu kaasutus										
Jätteen energiakäyttö										
Pyrolyysiöljy aluelämmityksessä										
Tuulivoima, rannikko										
Tuulivoima, meri/tunturi										
Integroitu aurinkosähkö										
Aurinkolämmitys										
Kiinteistölämpöpumput										
Bioöljy kiinteistökattiloissa										
Kotitaloudet: valaistus, viihde-elektroniikka										
Kotitaloudet: muut laitteet jne.										
Entsyymiavusteinen hierteen valmistus										
Biopulping-hierremassa										
N ₂ O:n hajoitus typpihapon valmistuksessa										
CO ₂ :n erotus masuunikombissa										
Kaatopaikkakaasun talteenotto										
F-kaasut: vuotojen vähentäminen jne.										
F-kaasut: korvaavat tekniikat & kylmäaineet										



7. Jatkotutkimustarpeen kohteita

Skenaariotarkastelun eri teknologioita koskevien tulosten perusteella koottiin lista sellaisista teknologian kehityskohteista ja käyttöönoton edistämiskohteista, joihin panostamalla voidaan edistää kasvihuonekaasujen kustannustehokasta rajoittamista Suomessa tai suomalaisen päästöjä rajoittavan teknologian vientimahdollisuuksia.

Teknologian kehitystyön kohteita Suomessa

1. Energiantuotanto

1.1 Bioenergian tuotantoteknologia

- biopolttoaineiden korjuuteknologia:
 - hakkuutähteet päätehakkuiden yhteydessä
 - tähdepuuhake harvennuksista ja nuorista metsistä
- biopolttoaineiden logistiikka
- kierrätyspolttoaineiden tuotantoteknologia
- peltobiomassan tuotantoteknologia
- pyrolyysiöljyn valmistustekniikat
- puu- ja seosbiopellettien valmistusteknologia
- liikennepolttoaineiden biokomponentit
 - tuotanto ja saatavuus Suomessa
 - käyttööminäisyyksien kehittäminen Pohjois-Euroopan oloihin

1.2 Bioenergian hyödyntämisteknologia

- puubiomassan kuivaustekniikat
- pienen mittakaavan vähäpäästöiset sovellukset yhteistuotantoon
 - pienet leijukattilavoimalaitokset
 - ORC-prosessiin perustuvat minivoimalaitokset
- biopolttoaineiden kaasutusmoottorilaitokset
- biopolttoaineiden kaasutuskombitekniikka
- biopolttokennot
- teollisuuden soodakattilatekniikoiden kehitys (mm. rakennusasteen nostomahdollisuudet, kaasutuskombitekniikka)
- kierrätyspolttoaineiden kaasutus ja muut tehokkaat hyödyntämistekniikat

1.3 Muihin uusiutuviin energialähteisiin perustuva tuotanto

- kehittyneet tuulivoimalat Pohjois-Euroopan oloihin
 - merituulipuistot jäätyvillä merialueilla
 - muut kylmien olojen sovellukset, mm. tunturit
- pienvesivoiman hyödyntäminen

- aurinkoenergiajärjestelmien suorituskyvyn optimointi pohjoisissa oloissa
- energian varastointitekniikat erityisesti aurinkoenergian hyödynnettävyyden lisäämiseksi

2. Teollisuus

- tekniset ratkaisut energiankäytön tehostamiseen
- biotekniset menetelmät metsäteollisuuden mekaanisessa massanvalmistuksessa (entsyymit, lahottajasienet, 'biopulping')
- kierrätyspolttoaineiden ja -raaka-aineiden tehokkaat hyödyntämismenetelmät
- uudet prosessijäähdytysratkaisut F-kaasujen vähentämiseksi
- CO₂:n talteenottomahdollisuudet erityisesti metalliteollisuudessa

3. Kotitaloudet ja palvelut

3.1 Rakennustekniikka

- matalaenergiarakentamisen kehittyneet ratkaisut
- integroidut aurinkoenergiajärjestelmät Pohjois-Euroopan oloihin

3.2 Rakennusten lämmitys ja jäähdytys

- automaattisyyttöiset, vähäpäästöiset lämmityskattilat eri biopolttoainelasteille
- pyrolyysiöljykattilat
- aurinkolämmitysjärjestelmät Pohjois-Euroopan oloihin
- kehittyneet ilmalämpöpumppujärjestelmät
- kaukojäähdytysteknologia
- sähkölämmityksen älykkäät ohjausjärjestelmät
- ilmastoinnin tekniset ratkaisut F-kaasujen vähentämiseksi

3.3 Sähkölaitteet

- pienloistelamppuihin perustuvien valaisimien tuotekehitys
- F-kaasujen vähentämisen tekniset ratkaisut (uudet kylmäaineet, kuten CO₂, jne.)

4. Liikenne

- liikenteen biokomponenttien käyttöominaisuuksien kehittäminen Pohjois-Euroopan oloihin
- kylmäkuljetusten tekniset ratkaisut F-kaasujen vähentämiseksi
- taajamien liikennejärjestelmien kehittäminen

Teknologian käyttöönoton ja viennin edistämistarpeita Suomessa

1. Energiantuotanto

- hajautetun pienen kokoluokan CHP-tuotantopotentiaalin hyödyntäminen
- uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman toteutumisen seuranta
- kansallinen tuulivoiman t&k-strategia vientimahdollisuuksien edistämiseksi

2. Teollisuus

- uudet sähköä säästävät teknologiset ratkaisut metsäteollisuudessa, kuten biotekniset menetelmät metsäteollisuuden mekaanisessa massanvalmistuksessa (entsyymit, 'biopulping')
- katalyyttiset menetelmät typpihapon valmistuksen prosessipäästöjen vähentämisessä
- kierrätyspolttoaineiden ja -raaka-aineiden hyödyntämisen laajentaminen
- CO₂-erotuksen käyttö teolliseen CO₂:n lisätuotantoon
- energiankäytön tehostamisen teknisten ratkaisujen käyttöönotto
- energiaa säästävän informaatioteknologian hyödyntäminen prosessien ohjauksessa
- ekologisen tuotesuunnittelun edistäminen

3. Kotitaloudet ja palvelut

3.1 Rakennustekniikka

- matalaenergiarakentamisen ratkaisujen käyttöönoton edistäminen
- integroitujen aurinkolämpö- ja sähköjärjestelmien hyödyntäminen

3.2 Rakennusten lämmitys ja jäähdytys

- uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen osana kiinteistöjen ja pientalojen energiaratkaisuja
- kaukojäähdytyksen käyttöönotto rakennusten jäähdytykseen
- erityisesti jäähdytysteknologiassa energiatehokkuus ja F-kaasujen päästöjen vähentäminen (vuotojen vähentäminen, vähäpäästöisempien teknisten ratkaisujen käyttöönotto jne.)

3.3 Laitesähkön käyttö

- pienloistelamppujen entistä laajempi käyttöönotto
- uusien laitteiden valmiustilan energiatehokkuuden parantaminen (normit tms.)
- älykkäiden säätöjärjestelmien käyttöönoton edistäminen uusissa laitteissa
- toimistotilojen energiatehokkaiden ratkaisujen entistä laajempi käyttöönotto
 - laitehankintaohjeiden kehittäminen

- käyttöönoton opastus ja laitteiden järkevän käytön informointi
- mittauksiin perustuvaa selvitystyö toimistotekniikkalaitteiden sähkökäytöstä, tehostamismahdollisuuksista sekä vaikutuksista ilmastointiin

4. Liikenne

- biokomponenttien käyttöönoton edistäminen
- uuden moottoriteknologian markkinaosuuden kasvun nopeuttaminen
- joukkoliikenteen kehittäminen
- uuden teknologian infrastruktuuriin siirtymisen ennakointi ja edistäminen
- ajoneuvojen ilmastoinnin uusien teknisten ratkaisujen käyttöönotto (F-kaasut)

Muita tutkimustarpeita

1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset energian tuotantoon ja teollisuuteen

- ilmastonmuutoksen vaikutusten tutkimus tarkempien alueellisten ilmastomallien avulla
- vaikutukset eri energia- ja raaka-ainelähteisiin, Suomessa erityisesti biomassan tuotanto- ja hyödyntämispotentiaaliin
- arvioiden epävarmuudet ja luotettavuusvälit
- ilmastonmuutoksen ääri-ilmiöihin varautuminen energiantuotannossa ja jakelussa (myrskyt jne.)

2. Uuden talouden vaikutukset energian kulutukseen ja teollisuuteen

- informaatio- ja kommunikaatioteknologian vaikutus dematerialisaatioon ja siitä aiheutuvat takaisinkytkennät
- palveluliiketoiminnan kansantuoteosuuden kasvun vaikutukset
- kansantalouden tilastoinnin kehittäminen rakenteellisten muutosten hallintaan

3. Järjestelmämalleilla tehtävät analyysit

3.1 Mallien ja mallinnusmenetelmien kehittäminen

- mallinnusmenetelmien kehittäminen hajautettua energiantuotantoa varten
- mallien tarkentaminen palvelujen ja asumisen sähkölaitteiden teknologian osalta
- pyrolyysiöljyn tuotantoprosessien kuvaaminen integroituna metsäteollisuuden prosesseihin
- ilmastonmuutoksen ja ilmastopöimusten kehittymisen epävarmuuksien ja päästöjen laskentamenetelmien mahdollisten muutosten huomioon ottaminen järjestelmämalleissa

3.2 Järjestelmämalleilla tehtävät skenaarioanalyysit

- hajautettujen energiantuotantojärjestelmien kustannustehokkaan potentiaalin analysointi
- tuulivoimakapasiteetin voimakkaan lisäyksen vaikutus sähköntuotantojärjestelmään
- aurinkoenergiajärjestelmien potentiaalin yksityiskohtaisempi kartoitus Suomen oloissa
- palvelujen ja asumisen sähkön käytön tehostusteknologian tarkempi analysointi
- materiaalien tehokkaamman käytön ja kierrätyksen kokonaisvaikutukset
- uusien liikennejärjestelmien kokonaisvaikutusten analysointi
- ilmastonmuutoksen vaikutukset energiantuotantojärjestelmän kehitykseen
- päästökaupan vaikutukset uuden energiateknologian kehityshankkeisiin ja käyttöönottoon
- biopolttoaineiden kaupan vaikutukset Suomen biomassataseisiin, bioenergiateknologian kehitykseen ja KHK-päästöihin
- Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden muutosten vaikutus Suomen energiajärjestelmään
- (erityisesti sähkön hintavaihtelujen voimistuminen vuodenajoittain)
- vihreiden sertifikaattien vaikutukset energian tuotantoteknologiaan

8. Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin Suomen energiajärjestelmän tulevaisuuden kehitystä olettaen, että ilmaston muuttuminen on tosiasia ja kasvihuonekaasujen päästöjä joudutaan Kioton sitoumuskauden jälkeenkin rajoittamaan. Tarkastelussa keskityttiin CLIMTECH-ohjelman eri projektien käsittelemiin teknologiavaihtoehtoihin, ja siten esimerkiksi mahdollista ydinvoiman tuotannon lisäämistä vuoden 2010 jälkeen ei otettu huomioon.

Kasvihuonekaasujen päästöjä tehokkaasti vähentävä teknologia on suurelta osalta uutta ja vasta kaupallistuvaa tekniikkaa. Jos energiajärjestelmää uusittaessa investoidaan pelkästään kustannuksiltaan edullisimpiin tuotanto- ja käyttötekniikoihin, tavanomaisella teknologian kehitystahdilla päästöjen väheneminen on varsin hidasta. Energian tuotantolaitosten rakentamiseen sitoutuu runsaasti pääomaa, ja laitoksia käytetään pitkään, tyypillisesti 25–40 vuotta. Tuotantojärjestelmää ei siten yleensä ole taloudellisesti järkevää korvata uudella ennen laitosten normaalin käyttöiän loppua.

Uudet energian tuotanto- ja käyttöteknologiat edellyttävät useimmiten vielä tavanomaista suurempia investointeja, sillä niiden kilpailukyky perustuu tyypillisesti aiempaa parempaan hyötysuhteeseen tai uusiutuvien energialähteiden hyödyntämiseen. Taloudellisen kilpailukyvyn saavuttamiseksi uutta tekniikkaa on yleensä kehitettävä pitkään ja määrätietoisesti. Skenaarioiden tulosten mukaan teknologia tarjoaa kuitenkin runsaasti sekä koeteltuja että vielä kehitystyötä edellyttäviä mahdollisuuksia päästöjen vähentämiseen. Koska energiajärjestelmän muutokset ovat hitaita, mahdollisuuksia voidaan hyödyntää täysmääräisesti vain kehittämällä riittävän ajoissa lupaavien tekniikoiden toimivuutta ja taloutta.

Hyviksi havaittuihin kehityskohteisiin panostaminen todennäköisesti kannattaa pitkällä tähtäimellä. Tulosten mukaan teknologian nopea kehittyminen ja käyttöönotto voi vähentää päästöjen rajoittamisen kustannuksia sadoilla miljoonilla euroilla vuodessa. Teknologian käyttäjien eduksi koituvien kustannussäästöjen lisäksi teknologisen osamisen kärjessä pysyminen laajentaa samalla merkittävästi teknologiaa kehittävien yritysten vientimahdollisuuksia. Ajoissa alkanut kehitystyö tuottaa taloudellisesti edullisimman kokonaistuloksen ja vähentää eniten päästöjä.

Teknologian nopea kehittyminen ja käyttöönotto voi myös tuntuvasti vähentää suomalaisten yritysten tarvetta päästöoikeuksien ostoon, joten kehityspanostuksesta voidaan saada tätä kautta selvää lisähyötyä. Parhaimmassa tapauksessa teknologia luo mahdollisuuksia päästöoikeuksien myyntiin niiden ostamisen sijasta.

Tarkastelluissa skenaarioissa Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen kannalta keskeisimmiksi teknologiaryhmiksi osoittautuivat Kioton periodin jälkeen bioenergia- ja tuulivoimatekniikat. Näiden ohella päästöjä voidaan kuitenkin vähentää

kustannustehokkaasti lukuisilla muillakin teknologisilla ratkaisuilla. Esimerkiksi energian loppukäytön tehostamisessa, jätehuollossa, jäähdytysteknologiassa ja teollisuusprosessien yhteydessä on kehitteillä monia hyviä teknisiä keinoja päästöjen vähentämiseksi. Suomessa ei luonnollisesti voida tehdä kaikkien lupaavien tekniikoiden kehitystyötä, joten monissa tapauksissa panostuksen tarve kohdistuu teknologian käyttöönoton edistämiseen.

Suorien taloudellisten hyötyjen ohella kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämistoimet voivat aiheuttaa myös tuntevia myönteisiä sivuvaikutuksia muiden ilmansaasteiden vähenemisenä ja siten paikallisen ja alueellisen ilmanlaadun paranemisena. Tulosten mukaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen johtaa suoraan energian tuotannon ja käytön rikin- ja typenoksidipäästöjen vähenemiseen. Hiukkaspäästöihin ei voitu osoittaa yhtä suoraa vaikutusta, mutta niidenkin merkittävään vähentämiseen teknologia tarjoaa hyvät mahdollisuudet, erityisesti pienpoltossa.

Energiateknologian kehitystyössä Suomessa voidaan arvioida olevan hyvä maaperä kehitys- ja demonstrointihankkeille, sillä energiajärjestelmämme on monipuolinen ja pääosin teknologialtaan kehittyntä. Puhtaita teknologioita kannattaa tällöin myös kehittää laaja-alaisesti, sillä kovin varmasti ei voida sanoa, millainen teknologia alkaa menestyä parhaiten. Viime kädessä päästöjen vähentämiseen ei kuitenkaan riitä pelkkä teknologia. Yhtä lailla sekä yksityisten kuluttajien että yritysten pitää muuttaa asenteitaan ja käyttö- ja kulutustapojaan. Mitä vähemmän kulutustavat muuttuvat, sitä vaikeampaa ja kalliimpaa on vähentää päästöjä.

Lähdeluettelo

Cogen 2002. L'avenir de la cogénération en Europe. Presentation by Peter Löffler at the seminar "Energie Décentralisée", 15 October 2002, Paris. Brussels: Cogen Europe. http://www.cogen.org/Downloadables/Presentations/Presentation_avenir_cogeneration.ppt

Dahlbo, H., Petäjä, J., Jouttijärvi, T., Melanen, M., Tanskanen, J.-H., Koskela, S. & Pylkkö, T. 2000. Jätesektorin mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristökeskuksen moniste 197. 100 s.

EEA 2002. Energy and environment in the European Union. Copenhagen: European Environment Agency, Environmental issue report No 31. 69 s.

Ekono 1997. Sähköntuotantokustannukset. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energia-Ekono, Raportti 60K00790-Q090-007. 57 s. + liitt. 7 s.

Ekono 1999. CHP-ohjelman teknologiakriteerien määrittäminen. Espoo: Energia-Ekono. 11 s. + liitt.

Flyktman, M. 1999. Kiinteistöjen lämmitysvaihtoehtojen kilpailukyky. Jyväskylä: Jyväskylän Teknologikeskus, Bioenergian tutkimusohjelma, Julkaisuja 26. 93 s.

Harmoinen, A., Heikkilä, J., Nyberg, K. & Raiko, M. 2002. Korkean hyötysuhteen voimalaitostekniikoiden kehitysnäkymät ja vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin – hiili-, maakaasukombi- ja moottorivoimalaitostekniikat sekä prosessiteollisuuden kehitysnäkymät ja vaikutukset CHP-tekniikkaan. Helsinki: Fortum Engineering Oy. 62 s.

Helynen, S., Holttinen, H., Lund, P., Sipilä, K. & Wolff, J. 1999. Uusiutuvien energialähteiden edistämishojelman taustaselvitys. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, Tutkimuksia ja raportteja 24/1999. 112 s.

Helynen, S., Flyktman, M., Mäkinen, T., Sipilä, K. & Vesterinen, P. 2002. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2145. 110 s. + liitt. 2 s. <http://www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2145.pdf>

Hepola, J. & Kurkela, E. 2002. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. Espoo: VTT Tiedotteita 2155. 65 s. <http://www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2155.pdf>

IEA 2002a. Energy Balances of OECD Countries 1999–2000 (2002 edition). Paris: OECD, International Energy Agency. (Sähköinen tietokanta)

IEA 2002b. Renewables Information 2002. Paris: OECD, International Energy Agency. 177 s.

IEA 2002c. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 1971–2000 (2002 Edition). Paris: OECD, International Energy Agency. 400 s.

Kallioinen, A. Pere, J., Siika-aho, M., Lehtilä, A., Mälkki, H., Syri, S. & Thun, R. 2003. Biotechnical methods for improvement of energy economy in mechanical ulping. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Research Notes 2183. 86 s. + liitt. 10 s.

Kara, M., Hirvonen, R., Mattila, L., Viinikainen, S., Tuhkanen, S. & Lind, I. (toim.) 2001. Energy Visions 2030 for Finland. Helsinki: VTT Energia. 238 s.

Kemppi, H., Lehtilä, A. & Perrels, A. 2001. Suomen kansallisen ilmasto-ohjelman taloudelliset vaikutukset. Helsinki: Valtion taloudellinen tutkimuskeskus, Julkaisuja 75. 130 s. <http://www.vatt.fi/julkaisut/t/t82.pdf>

Koljonen, T., Siikavirta, H. & Zevenhoven, R. 2002. CO₂ capture, storage and utilisation in Finland. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Processes, Project Report PRO4/T7504/02, 03.07.2002. 96 s.

Korhonen, A., Pihala, H., Ranne, A., Ahponen, V. & Sillanpää, L. 2002. Kotitalouksien ja toimistotilojen laitesähkön käytön tehostaminen. Helsinki: Työtehoseura, Työtehoseuran julkaisuja 384. 158 s. <http://www.vtt.fi/pro/climtech/material/tj384.pdf>

Kosunen, P. & Rauhamäki, J. 1999. Biopolttoaineiden kilpailukyky sähkön ja lämmön tuotannossa. Jyväskylä: Jyväskylän teknologiakeskus, Bioenergian tutkimusohjelma, Julkaisuja 25. 70 s. + 30 s. liitt.

KTM 2001. Kasvihuonekaasujen vähentämistarpeet ja -mahdollisuudet Suomessa. Kansallisen ilmastostrategian taustaselvitys. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, Julkaisuja 4/2001. 169 s. <http://www.ktm.fi/ilmasto/Taustaraportti.pdf>

Kuiper, J. 2001. High temperature catalytic reduction of nitrous oxide emission from nitric acid production plants. Ranking of catalytic methods that convert nitrous oxide partially into nitric-oxide. Amsterdam: Continental Engineering BV, Novem, Novem project number 375001/0080. 59 s.

Lehtilä, A. & Tuhkanen, S. 1999. Integrated cost-effectiveness analysis of greenhouse gas emission abatement. The case of Finland. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Publications 374. 145 s. <http://www.inf.vtt.fi/pdf/publications/1999/P374.pdf>

Lehtilä, A. 2001. Possible energy futures for Finland. Teoksessa: Energy Visions 2030 for Finland. Helsinki: VTT Energia. 238 s.

Lohiniva, E., Sipilä, K., Mäkinen, T. & Hietanen, L. 2001. Jätteiden energiakäytön vaikutukset GHG-päästöihin. VTT Energia, Tutkimusselostus. 103 s.

Mäkelä, K., Tuominen, A. & Pääkkönen, E. 2002. LIPASTO 2001 Liikenteen päästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimusraportti RTE 3164/02, MOBILE 2 raportti M2T9916-13. 39 s. + liitt. 6 s. <http://www.lipasto.vtt.fi>

Ohlström, M., Mäkinen, T., Laurikko, J. & Pipatti, R. 2001. New concepts for biofuels in transportation. Biomass-based methanol production and reduced emissions in advanced vehicles 2001. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Research Notes 2074. 94 s. <http://www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2001/T2074.pdf>

Oinonen, T. & Soimakallio, S. 2001. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2099. 154 s. + liitt.17 s. <http://www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2001/T2099.pdf>

Peltola, E. & Holttinen, H. 2001. Tuulivoimamarkkinat suomalaisen teknologiaviennin kannalta. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Energian raportteja 45/2001. <http://www.vtt.fi/pro/climtech/material/tuulirap.pdf>

Pipatti, R., Tuhkanen, S., Mälkiä, P. & Pietilä, R. 2000. Maatalouden kasvihuonekaasupäästöt sekä päästöjen vähentämisen mahdollisuudet ja kustannustehokkuus. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja 841. 72 s. <http://www.inf.vtt.fi/pdf/julkaisut/2000/J841.pdf>

Powertechnics 1998. Maakaasun ja biopolttoaineiden lisäkäyttömahdollisuuksien kartoittaminen teollisuuden energiantuotannossa. Helsinki: Powertechnics Oy, Raportti K1230101. 23 s. + liitt.

Savolainen, I., Tuhkanen, S. & Lehtilä, A. (toim.) 2001. Teknologia ja kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen – Taustatyö kansallista ilmasto-ohjelmaa varten. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, Julkaisuja 1/2001. 198 s.

Sipilä, K., Oasmaa, A., Solantausta, Y. & Arpiainen, V. 1999. Perspectives for pyrolysis oil production and market in Scandinavia. Teoksessa: Power Production from Biomass III. Gasification and Pyrolysis R&D&D for Industry. Espoo: Technical Research Centre of Finland, VTT Symposium 192. S. 277–292.

Solpros 2001. Aurinkoenergia Suomen olosuhteisissa ja sen potentiaali ilmastomuutoksen torjunnassa. 22 s. <http://www.vtt.fi/pro/climtech/suomi/aurinkomahd.pdf>

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.

Syri, S. & Lehtilä, A. 2003. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2186. 69 s.

Tammelin, B., Forsius, J., Jylhä, K., Järvinen, P., Koskela, J., Tuomenvirta, H., Turunen, M.A., Vehviläinen, B. & Venäläinen, A. 2002. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia energiantuotantoon ja lämmitysenergian tarpeeseen. Helsinki: Ilmatieteen laitos, Raportteja 2/2002. 121 s.

Tilastokeskus 2002. Energiatilastot 2001. Helsinki: Tilastokeskus, Energia 2002:2. 151 s.

Tuhkanen, S. 2002. Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä: Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2142. 46 s.

<http://www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2142.pdf>

Vartiainen, E., Luoma, P., Hiltunen, J. & Vanhanen, J. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂-päästöt. Helsinki: Gaia Group Oy. 90 s. <http://www.vtt.fi/pro/climtech/material/hajentuotloppurap.pdf>

Wade 2002. World Survey of Decentralized Energy – 2002/2003. Edinburgh: World Alliance for Decentralized Energy. 49 s.

http://www.localpower.org/pages/WADE_Survey_final.pdf

Tekijä(t) Lehtilä, Antti & Syri, Sanna			
Nimeke Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita Climtech-ohjelman skenaariotarkastelu			
Tiivistelmä Raportissa esitellyn CLIMTECH-hankkeen tavoitteena oli selvittää teknologian potentiaalia ja kustannustehokkuutta Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä (noin vuoteen 2030) erilaisissa päästöjen rajoitusskenaarioissa. Työ tehtiin VTT Prosesseissa osana Tekesin CLIMTECH-teknologiaohjelmaa. Päästöjä vähentävän teknologian merkitystä arvioitiin työssä VTT:n laajalla energiajärjestelmämallilla EFOM, joka sisältää kattavasti kaikkien kuuden Kioton pöytäkirjaan sisältyvän kasvihuonekaasun kotimaiset päästölähteet sekä päästöjä vähentävien teknisten vaihtoehtojen kuvauksen. Työssä hahmoteltiin päästöjen rajoittamiseen liittyvän teknologian kehittymiselle kaksi varsin erilaista tulevaisuudenkuvaa. Tavanomaisen kehityksen skenaariossa oletettiin kansainvälisten ilmastonmuutoksen hillintään tähtäävien toimien etenevän hitaasti, jolloin päästöjä vähentävän teknologian kehittämiseen ei panosteta merkittävästi nykyistä enempää. Optimistisessa teknologian kehityksen skenaariossa puolestaan oletettiin ilmastonmuutoksen hillintätoimien vauhdittuvan merkittävästi ennen vuotta 2030. Tällöin päästöjä vähentävän teknologian kehittäminen nousee tärkeäksi ja teknologia kehittyy nopeasti sekä Suomessa että maailmanlaajuisesti. Työssä keskityttiin CLIMTECH-ohjelmassa käsiteltyihin teknologiaryhmiin, joten tarkastelun ulkopuolelle rajattiin mm. mahdollinen ydinvoiman lisärakentaminen vuoden 2010 jälkeen. Tulosten mukaan aikainen panostaminen hyviin kehityskohteisiin kannattaa pitkällä tähtäimellä. Teknologian nopea kehittyminen ja käyttöönotto voi vähentää Suomen päästöjen rajoittamisen kustannuksia sadoilla miljoonilla euroilla vuodessa. Kustannussäästöjen lisäksi teknologisen osaamisen kärjessä pysyminen laajentaa samalla merkittävästi teknologiaa kehittävien yritysten vientimahdollisuuksia. Vuoden 2010 jälkeen Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen kannalta keskeisimpiä teknologiaryhmiä ovat tulosten mukaan bioenergia- ja tuulivoimatekniikat. Näiden ohella päästöjä voidaan kuitenkin vähentää kustannustehokkaasti lukuisilla muillakin teknologisilla ratkaisuilla. Energian loppukäytön tehostamisessa, jätehuollossa, jäädytysteknologiassa ja teollisuusprosessien yhteydessä on monia lupaavia teknisiä keinoja päästöjen vähentämiseksi. Teknologian kehittämisen ohella merkittäviä tuloksia voidaan kuitenkin saavuttaa myös uuden teknologian käyttöönottoa edistämällä. Tulosten mukaan teknologian kehityksellä on selviä kytkentöjä myös mahdollisen tulevan kasvihuonekaasujen päästökaupan taseeseen.			
Avainsanat greenhouse gases, abatement, emissions reduction, cost-effectiveness, technology, CLIMTECH, Finland, energy production, energy supply systems, scenarios			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6151-1 (nid.) 951-38-6152-X (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinumero C2SU00183	
Julkaisuaika Toukokuu 2003	Kieli Suomi, Engl. abstr.	Sivuja 62 s.	Hinta B
Projektin nimi Climtech		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Author(s) Lehtilä, Antti & Syri, Sanna			
Title Scenarios for the Finnish energy system and emissions Study made for the CLIMTECH Programme			
Abstract <p>The report presents results from a scenario study made under the CLIMTECH Technology programme. The objective of the study was to assess the potential and cost-efficiency of various technology options in the abatement of greenhouse gas emissions in Finland. The prospects were studied in both the short term and the medium term up to the 2030s. Technology projections drawn from the results of a total of 27 CLIMTECH projects were used in the analysis. The assessment was based on the use of a large energy system model, which has an extensive coverage of the emission sources and reduction measures of all the six greenhouse gases included in the Kyoto protocol. The estimated impacts of climate change on the energy system were also taken into account in the analysis.</p> <p>Two distinct future scenarios were constructed for the development of low-emission technologies. In the 'conventional' scenario it was assumed that international measures for climate change mitigation evolve slowly. As a result, the penetration of new energy technologies would depend highly on economic policy instruments, as there would be no direct market push for cleaner technologies. In the 'optimistic' scenario, on the other hand, climate change mitigation measures would be accelerated by the year 2030, and they would lead to rapid development and employment of cleaner technologies, both world-wide and in Finland. The main focus of the study was on those technologies that were investigated under the CLIMTECH Programme. Consequently, some important technology options, such as increased nuclear power, were excluded from the analysis.</p> <p>Systematic investments in technology development were found to yield substantial benefits in the long term, by decreasing emission reduction costs and by facilitating more ambitious reduction targets. The cuts in emission reduction costs could be several hundred million euros per annum in the case of rapid deployment of new technology. In addition to direct cost savings, the prospects for increasing exports would be much higher for the Finnish technology industries by breaking into the forefront of advanced energy technology markets. Advanced biofuel production and utilisation technologies and off-shore wind power proved to have the largest cost-effective emission reduction potential in Finland by the 2030s. Nevertheless, there is a large number of other technology options that should not be overlooked, albeit having a small potential individually. The results also indicated a clear relationship between technological development and national emission trading patterns.</p>			
Keywords greenhouse gases, abatement, emissions reduction, cost-effectiveness, technology, CLIMTECH, Finland, energy production, energy supply systems, scenarios			
Activity unit VTT Processes, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6151-1 (soft back ed.) 951-38-6152-X (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)			Project number C2SU00183
Date May 2003	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 62 p.	Price B
Name of project Climtech		Commissioned by National Technology Agency of Finland (Tekes)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/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	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT PROSESSIT – VTT PROSESSER –VTT PROCESSES

- 2135 Ristolainen, Ilari. Voimalaitos- ja teollisuusrengasverkon maasulun paikannus. 2002. 19 s.
- 2137 Kumpulainen, Heikki, Peltonen, Terttu, Koponen, Ulla, Bergelin, Mikael, Valkiainen, Matti & Wasberg, Mikael. In situ voltammetric characterization of PEM fuel cell catalyst layers. 2002. 28 p. + app. 4 p.
- 2138 Ranta, Jussi & Wahlström, Margareta. Tuhkien laatu REF-seospoltossa. 2002. 53 s. + liitt. 13 s.
- 2139 Lohiniva, Elina, Sipilä, Kai, Mäkinen, Tuula & Hietanen, Lassi. Jätteiden energiakäytön vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin. 2002. 119 s.
- 2141 Laine-Ylijoki, Jutta, Wahlström, Margareta, Peltola, Kari, Pihlajaniemi, Miina & Mäkelä, Esa. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. 2002. 51 s. + liitt. 59 s.
- 2142 Tuhkanen, Sami. Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. 2002. 46 s.
- 2143 Meinander, Harriet & Varheenmaa, Minna. Clothing and textiles for disabled and elderly people. 2002. 58 p. + app. 4 p.
- 2145 Helynen, Satu, Flyktman, Martti, Mäkinen, Tuula, Sipilä, Kai & Vesterinen, Pirkko. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. 2002. 110 s. + liitt. 2 s.
- 2153 Hänninen, Seppo & Lehtonen, Matti. Earth fault distance computation with fundamental frequency signals based on measurements in substation supply bay. 2002. 40 p.
- 2155 Hepola, Jouko & Kurkela, Esa. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. 2002. 65 s.
- 2163 Miettinen, Jaakko & Hämäläinen, Anitta. GENFLO - A general thermal hydraulic solution for accident simulation. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2163. 75 p. + app. 4. p.
- 2164 FINNUS, The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 1999-2002. Final Report. Ed by Riitta Kyrki-Rajamäki & Eija Karita Puska. 267 p. + app. 68 p.
- 2165 FINNUS, The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 1999-2002. Executive Summary. Ed. by Riitta Kyrki-Rajamäki. 2002. 26 p. + app. 18 p.
- 2177 Mäkelä, Kari, Laurikko, Juhani & Kanner, Heikki. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LIISA 2001.1 -laskentajärjestelmä. 2002. 63 s. + liitt. 42 s.
- 2186 Syri, Sanna & Lehtilä, Antti. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin. 2003. 69 s.
- 2187 Siltanen, Satu. Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuudesta. Kirjallisuusselvitys. 2003. 72 s.
- 2196 Lehtilä, Antti & Syri, Sanna. Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita. Climtech-ohjelman skenaariotarkastelu. 2003. 62 s.

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