

Teknologiapolut 2050

Skenaariotarkastelu kasvihuonekaasupäästöjen
syvien rajoittamistavoitteiden
saavuttamiseksi Suomessa

Teknologiapolut 2050

Skenaariotarkastelu kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa

**Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja
energiastrategian laatimista varten**

Antti Lehtilä, Sanna Syri & Ilkka Savolainen

ISBN 978-951-38-7226-7 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7227-4 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2008

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026

Kannen kuva: Leonardo da Vinci

Lähde: Wikimedia commons,

http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Leonardo_da_Vinci_helicopter.jpg

Toimitus Maini Manninen

Edita Prima Oy, Helsinki 2008

Lehtilä, Antti, Syri, Sanna & Savolainen, Ilkka. Teknologiapolut 2050. Skenaariotarkastelu kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa [Technology pathways 2050. Scenarios on deep greenhouse gas emissions reductions in Finland]. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2433. 65 s.

Avainsanat energy scenario, technology, deep emission reductions, climate change mitigation, energy use, energy production

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaadittavat suuret kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset tulevat mullistamaan nykyisen pääosin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan maailman energijärjestelmän. Energiatehokkuuden parantaminen ja uusiutuvien energialähteiden ja ydinenergian käytön lisääminen ovat keskeisiä keinoja päästöjen vähentämisessä. Teknologian mahdollistamat keinot ovat merkittävä osa kokonaisuutta, jolla kasvihuonekaasupäästöjen rajoituksiin pyritään.

Tässä raportissa esitellään skenaarioita Suomen kasvihuonekaasujen kustannustehokkaaksi päästöjen vähentämiseksi vuoteen 2050 asti. Skenaariot on laadittu VTT:n Suomen TIMES-energiajärjestelmämallilla. Työssä arvioidaan, miten Suomi voisi erilaisissa teknologian, energijärjestelmän ja päästökaupan kehityskuluissa vastata hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC:n) arvioon, jonka mukaan ilmastonmuutoksen tehokkaaksi hillitsemiseksi vaaditaan maailman kasvihuonekaasupäästöjen 50–85 %:n vähennys vuosisadan puoliväliin mennessä sekä EU:n tavoitteeseen päästöjen vähentämisestä 60–80 % vuoteen 2050 mennessä.

Teknologian keinoja päästöjen vähentämiseksi on olemassa runsaasti kaikilla sektoreilla. Tulosten mukaan Suomessa voitaisiin vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä 60–66 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jos päästöoikeuksien hinta on korkeintaan 80 €/t(CO₂-ekv.). Energian käytön tehostuminen nousee tärkeäksi tekijäksi Suomen päästöjen vähentämisessä vuoteen 2050 asti. Keskeisiä päästöjä vähentäviä tuotantoteknologioita ovat bioenergiateknologiat, tuulivoima ja ydinvoima, joiden kustannustehokas toteutumismäärä riippuu oletetusta päästökaupan hintakehityksestä, teknologian kehityksestä sekä mahdollisista muista rajoitteista. Päästöjä vähentävien teknologioiden käyttöönottoa hidastavat kustannukset ja investointien uusiutumisen hitaus. Esimerkiksi energiantuotantolaitosten käyttöikä on tyypillisesti 20–50 vuotta, ja rakennusten käyttöikä luokkaa 50–100 vuotta.

Vuoteen 2050 mennessä myös Suomen ilmasto tulee muuttumaan tuntuvasti. Yleisten epäedullisten muutosten ohella ilmaston muuttuminen vaikuttaa vähentäen lämmitystarvetta, lisäten jäähdytystarvetta sekä lisäten ennusteiden mukaan jonkin verran tuulija vesivoiman tuotantopotentiaalia.

Lehtilä, Antti, Syri, Sanna & Savolainen, Ilkka. Teknologiapolut 2050. Skenaariotarkastelu kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa [Technology pathways 2050. Scenarios on deep greenhouse gas emissions reductions in Finland]. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2433. 65 p.

Keywords energy scenario, technology, deep emission reductions, climate change mitigation, energy use, energy production

Abstract

Massive greenhouse gas emission reductions are needed in order to mitigate climate change. The reductions will pose dramatic changes in today's mainly fossil fuel based energy system. Improving energy efficiency and increasing the use of renewable energy sources and nuclear energy are significant means to reduce emissions. Technology plays an important role in enabling deep greenhouse gas emission reductions.

This report presents scenario calculations for the Finnish energy system using the TIMES energy system model available at VTT. The calculations provide estimates, which technologies would be economically optimal to apply in order to reach the emission reduction targets. Scenarios have been developed for alternative development pathways of technology, the Finnish energy system and international emissions trading. The aim of the scenarios was to estimate, how Finland could respond to the recent IPCC estimate that effective mitigate climate change mitigation requires global emissions reductions in the order of 50–85% by the year 2050, and to the EU goal of reducing emissions by 60–80% by the year 2050.

In Finland, GHG emissions can be reduced by 60–66% from 1990 to 2050, if emission allowance prices remain less than 80 €/t(CO₂-ekv.) Increased energy use efficiency becomes an important factor in emissions reductions by 2050. Key reduction technologies in energy production are bioenergy technologies, wind power and nuclear power. The cost-efficient amount of these technologies in the Finnish energy system varies depending on assumptions of emissions trading price development, technology development and other possible constraints. A major part of the technology opportunities are already on the market and therefore immediately applicable. The adoption is restricted by costs and long investment cycles in many of the applications.

By the year 2050, also the Finnish climate will change considerably. Besides the major general harmful effects, heating requirements decrease, cooling needs increase, and wind power and hydro power potentials are estimated to increase.

Alkusanat

Ilmaston muuttumisen hillintä on valtava haaste. Euroopan unioni on esittänyt, että maapallon keskilämpötilan nousu tulisi rajoittaa kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna, jotta ilmaston muuttumisesta aiheutuvat haitat pysyisivät siedettävällä tasolla. Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (IPCC) on arvioinut, että tämän tavoitteen saavuttamiseksi maailman kasvihuonekaasupäästöjä tulee vähentää 50–85 % vuosisadan puoliväliin mennessä. EU on varautunut vähentämään päästöjä vähintään 20 % vuoteen 2020 mennessä ja 60–80 % vuoteen 2050 mennessä.

Tässä raportissa esitellään skenaarioita Suomen kasvihuonekaasujen kustannustehokkaaksi päästöjen vähentämiseksi vuoteen 2050 asti. Skenaariot on laadittu VTT:n Suomen TIMES-energiajärjestelmämallilla olettaen erilaisia teknologian, energiajärjestelmän ja kansainvälisen päästökaupan kehityskulkuja. Raportissa pyritään esittämään joitakin vaihtoehtoisia kehityskulkuja, jotka mahdollistavat kyseiset hyvin vaativat päästövähennykset.

Tutkimuksen ja kehityksen avulla voidaan lisätä päästöjen rajoittamisen mahdollisuuksia ja alentaa niiden kustannuksia. Päästöjä rajoittavan teknologian käyttöönottoa toimijoiden keskuudessa voidaan pyrkiä lisäämään erilaisilla ohjauskeinoilla, joita ovat esimerkiksi investointituet, syöttötariffit, verohelpotukset ja päästökauppa sekä -verot. Tutkimukseen ja kehitykseen suunnattavat panokset ja ohjauskeinojen valinta ovat olennaisessa osassa päästöjen rajoittamistavoitteiden tehokkaaksi ja kokonaistalouden kannalta optimaaliseksi saavuttamiseksi.

Raportti on laadittu uuden ilmasto- ja energiastrategian valmistelun tueksi työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) tarpeita varten VTT:ssä (Valtion teknillinen tutkimuskeskus). Hanke kuuluu Tekesin ClimBus-ohjelmaan, ja sen rahoittajina ovat toimineet Tekes ja VTT.

Energiajärjestelmämallien avulla voidaan arvioida kustannustehokkaita tapoja päästä vaadittaviin päästörajoitustavoitteisiin. Näitä arvioita voidaan käyttää hyväksi poliittisessa päätöksenteossa ohjaamaan rajallisia varoja mahdollisimman tehokkaisiin vähennyskohteisiin, eli toimiin joilla tietyllä rahamäärällä saadaan mahdollisimman suuri päästöjen vähenemä. Tekijät toivovat että tämä raportti osaltaan tuo hyödyllistä taustatietoa käytettäväksi ajankohtaisessa suomalaisessa päätöksenteossa.

Antti Lehtilä

Sanna Syri

Ilkka Savolainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Symboliluettelo.....	7
1. Johdanto	8
2. Suomen TIMES-energiajärjestelmämalli.....	11
3. Tarkasteltavat skenaariot	12
3.1 Yleisiä lähtökohtia.....	12
3.2 Ilmaston lämpenemisen oletetut vaikutukset.....	16
3.3 Teknologiakohtaisia oletuksia.....	17
3.3.1 Polttoaineiden tuotantoteknologia.....	17
3.3.2 Vesivoima	18
3.3.3 Tuulivoima	21
3.3.4 Ydinvoima.....	22
3.3.5 Teollisuuden päästöjä vähentävä teknologia.....	23
3.3.6 Asumisen ja palvelujen energiateknologia.....	24
3.3.7 Liikenteen ajoneuvoteknologia	26
3.3.8 Hiilidioksidin talteenotto ja loppusijoitus	27
3.4 Yhteenveto tarkastelluista skenaarioista.....	28
4. Tuloksia.....	31
4.1 Energian kokonaiskulutus	31
4.2 Sähköenergian hankinta.....	34
4.3 Sähkön kokonaiskulutus.....	38
4.4 Uusiutuva energia	41
4.5 Asuin- ja palvelurakennusten lämmitys	43
4.6 Liikenteen energian käyttö	45
4.7 Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt	47
4.8 Päästöjen vähentämistoimet eri sektoreilla	49
4.9 Päästöjen vähentämisen suorat kustannukset.....	53
5. Säästöinvestointien herkkyystarkastelu	56
6. Yhteenveto	59
Lähdeluettelo	62

Symboliluettelo

CFC	kloorifluorihiihiyhdisteet
CH ₄	metaani
CO ₂	hiilidioksidi
ETSAP	IEA:n Energy Technology Systems Analysis Programme
IEA	International Energy Agency (kansainvälinen energiajärjestö)
IPCC	hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
N ₂ O	typpioksiduuli
UNFCCC	YK:n ilmastopimus (United Nations' Framework Convention on Climate Change)

1. Johdanto

Euroopan unioni on esittänyt tavoitteekseen, että maapallon keskilämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. Tällä pyritään rajoittamaan ilmaston muuttumisesta aiheutuvia haittoja siedettävälle tasolle. Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) mukaan kahden asteen rajoite merkitsisi sitä, että maailman kasvihuonekaasujen päästöt tulisi rajoittaa tämän vuosisadan puoliväliin mennessä 50–85 prosenttia alle nykyisen tason (IPCC 2007). Ns. Sternin raportin (Stern 2006) mukaan päästöjen rajoittamisen kustannukset olisivat selvästi pienemmät kuin rahaksi muutetut ilmastonmuutoksen haitat.

IPCC:n (2007) mukaan ilmakehän nykyinen CO₂-pitoisuus on noin 380 ppm, muista Kioton kaasusta, lähinnä metaanista ja dityppioksidista, aiheutuva hiilidioksidiekvivalenttinen pitoisuus on noin 50 ppmCO₂ekv. Kahden asteen lämpötilan nousua vastaava pitoisuus on 450 ppmCO₂ekv, jos ilmaston herkkyydeksi oletetaan IPCC:n paras arvio 3 °C/550 ppm. IPCC:n mukaan arvion ilmaston herkkyyden epävarmuusväli on huomattava, 2–4,5 °C, eivätkä 4,5 astetta suuremmat arvot ole kokonaan poissuljettuja. Nykyinen pitoisuuden kasvu on noin 2 ppm/vuosi, joten Kioton kaasujen hiilidioksidiekvivalenttipitoisuus saavuttaa 450 ppm:n tason noin kymmenessä vuodessa. Jos otetaan huomioon ilmakehässä jo olevat CFC-kaasut, ekvivalenttinen pitoisuus on 455 ppm, siis yli 2 °C -astetta vastaavan pitoisuustason. Näiden seikkojen vuoksi IPCC päättyy varsin rajuihin päästönvähennystavoitteisiin, jos lämpötilarajoite on noin kaksi astetta. Käytännössä lämpötilan nousua viivästyttävät kuitenkin ihmisen toimesta ilmakehään tulevat hiukkaspäästöt, jotka pienentävät säteilypakotetta¹ ja ilmakehän laskennallista hiilidioksidiekvivalenttipitoisuutta, sekä valtamerten suuri lämpökapasiteetti.

Koska maailman väestö ja talous kasvavat, kasvihuonekaasujen päästöjen rajoitustavoite on hyvin haastava. Kehittyneissä maissa päästöt ja varallisuus henkeä kohti ovat suuremmat kuin kehitysmaissa, ja on odotettavissa, että päästöjen rajoittamisen tavoitteet tulevat tulevissa päästönrajoitussopimuksissa olemaan suuremmat kehittyneissä maissa kuin kehitysmaissa. YK:n vuonna 1992 solmitun ilmastopimuksen (United Nations' Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) tavoite on vakauttaa ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuudet vaarattomalle tasolle. Vuonna 1997 sovittiin ilmastopimukseen liittyen ns. Kioton pöytäkirjasta, jolla rajoitetaan kehittyneiden maiden päästöjä kaudella 2008–2012. Joulukuussa 2007 sovittiin Baliilla käydyissä ilmastoneuvotte luissa, että vuoden 2009 loppuun mennessä pyritään uuteen laajaan päästöjenrajoituspöytäkirjaan, jossa rajoitetaan sekä kehittyneiden maiden että kehitysmaiden päästöjä

¹ Säteilypakote tarkoittaa maapallon säteilyenergiatasapainon poikkeamaa. Sitä kuvataan tavallisesti yksiköllä W/m², mutta se voidaan ilmaista myös hiilidioksidi-ekvivalenttisenä pitoisuutena ppm-yksiköissä. Säteilypakote johtaa vähitellen maapallon lämpötilan muutokseen.

Kioton kauden jälkeen kansallisesti soveltuvilla toimilla ottaen huomioon kestävä kehitys. Myös Yhdysvallat on mukana neuvotteluissa, vaikka se jäi pois Kioton pöytäkirjasta.

Euroopan unioni on ilmoittanut olevansa valmis 30 prosentin päästönvähennykseen, jos muut maat tekevät vastaavia toimia. EU on yksipuolisesti sitoutunut vähentämään päästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä. EU on myös esittänyt tavoitteekseen 60–80 prosentin vähennyksen vuodelle 2050. Lisäksi EU on ottamassa sitovaksi tavoitteekseen lisätä uusiutuvan energian osuutta 20 prosenttiin, tehostaa energian käyttöä 20 prosenttia sekä nostaa liikenteen biopolttoaineiden osuuden 10 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Päästöjen rajoittamisesta ja uusiutuvan energian osuuden nostamisesta EU esitti maakohtaiset tavoitteensa ja ohjelmansa tammikuussa 2008. Suomen päästörajoitustavoitteeksi EU esitti 16 prosenttia ei-päästökauppasektorilla. Lisäksi EU esitti, että päästökauppasektorin maakohtaisista kiintiöistä luovutaan ja päästöoikeuksien huutokauppa otetaan laajasti käyttöön, ensiksi energiasektorilla.

Ilmastonmuutokseen vaikuttavia päästöjä voidaan vähentää periaatteessa kahdella tavalla. Kulutus voi muuttua vähemmän päästöjä aiheuttavaan suuntaan tai voidaan ottaa käyttöön teknisiä ratkaisuja, jotka aiheuttavat vähemmän päästöjä energian, tuotteiden ja palvelujen tuottamisessa. Kulutusta ja talouden laajuutta bruttokansantuotteella mitattuna pyritään kaikissa maissa kasvattamaan. Kasvu painottuu etenkin kehittyneissä maissa yhä enemmän vähän energiaa kuluttaville aloille, kuten palveluihin, mutta juuri mikään sektori ei absoluuttisesti supistu. Teknisille ratkaisuille jää siis hyvin merkittävä osa päästöjen rajoittamisessa. Kyseeseen tulevat ratkaisut koskevat ennen kaikkea energian tuotantoa ja käyttöä eri tarkoituksiin mukaan lukien liikenne sekä myös muut päästöjen lähteet, kuten teollisuusprosessit ja jätehuolto.

Kasvihuoneilmiön hillintä tulee muuttamaan hyvin suuresti energiateknologioita ja -taloutta koko maailmassa pitkän ajan kuluessa. Uuden teknologian kehittämisellä voidaan alentaa päästöjen rajoittamisen kustannuksia. Satojen miljardien eurojen vuotuiset energiainvestoinnit siirtyvät vähitellen lähivuosisikymmeninä kasvihuonekaasujen päästöjä tuottavista teknologioista suureksi osaksi uusiutuvia energialähteitä käyttäviin ja vähäpäästöisiin tai päästöttömiin teknologioihin sekä energian käytön tehokkuuden lisäämiseen.

Yritysten toimintaympäristö on muuttumassa globalisoituvassa maailmassa. Pääomaa siirtyy ja kauppaa käydään maailmanlaajuisesti, yhteiskunnan säätely vähenee monilla alueilla ja markkinat vapautuvat. Yritysten toimintaan vaikuttavat aikajänteet ovat lyhentyneet, mikä asettaa erittäin suuren haasteen pitkän ajan ympäristövaikutusten hallinnalle sekä yrityksissä että julkisessa hallinnossa.

Kasvihuonekaasujen kustannustehokkaita päästövähennysmahdollisuuksia arvioidaan yleisesti erilaisten teknis-taloudellisten mallien avulla. VTT on jo pitkään laatinut Suomen energiajärjestelmää ja kasvihuonekaasujen päästöjen kehitystä arvioivia skenaarioita IEA:n ETSAP-mallinnusyhteistyössä käytetyillä EFOM- ja sittemmin TIMES-malleilla (mm. Lehtilä & Tuhkanen 1999, Lehtilä & Syri 2003, Lehtilä et al. 2005, Forsström & Lehtilä 2005). Lisäksi VTT on ensimmäisten joukossa ottanut käyttöön IEA/ETSAP:n globaalin TIAM-mallin, jolla voidaan vastaavalla tavalla arvioida maailman energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen tulevaisuuden kehityskulkuja (esim. Koljonen et al. 2008, Syri et al. 2008).

Myös esimerkiksi IPCC:n arviot ilmastonmuutoksen hillinnästä ja kustannustehokkaista mahdollisuuksista perustuvat sekä laajoihin kirjallisuuskatsauksiin yksittäisistä päästövähennystoimista ja niiden mahdollisuuksista että erilaisiin teknis-taloudellisiin malleihin ja niistä laadittuihin tieteellisiin artikkeleihin. Keskeisinä esimerkkeinä jälkimmäisestä voidaan mainita mm. hollantilaisen MNP:n IMAGE-malli (esim. van Vuuren et al. 2007), IIASA:n MESSAGE-malli (esim. Keppo et al. 2006, Riahi et al. 2006), amerikkalainen MERGE (esim. Kypreos 2006) ja japanilainen AIM (esim. Fujino et al. 2006). Myös muita vastaavia malleja on runsaasti. EU:n IPTS (Institute for Prospective Technological Studies) käyttää ja kehittää POLES-mallia, jota käytetään EU:n päätöksenteon tukena (esim. Criqui et al. 2006).

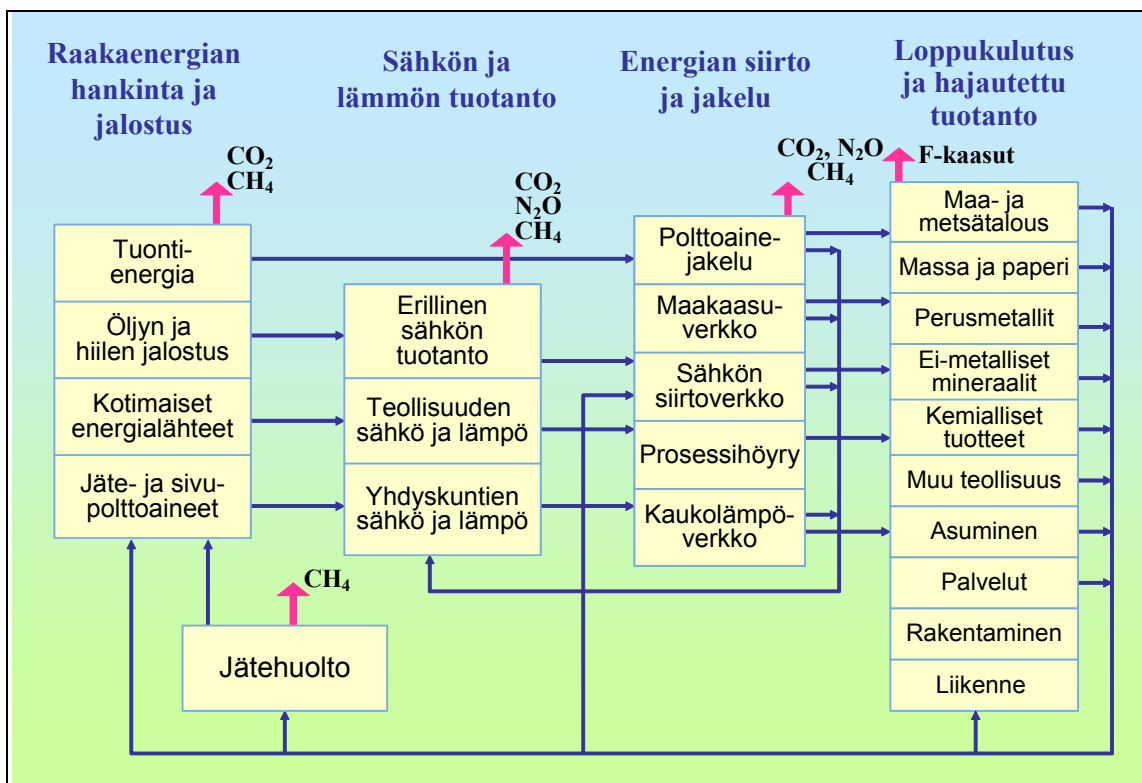
Energiajärjestelmämallien avulla voidaan arvioida kustannustehokkaita tapoja päästä vaadittaviin päästörajoitustavoitteisiin. Näitä arvioita voidaan käyttää hyväksi poliittisessa päätöksenteossa ohjaamaan rajallisia varoja mahdollisimman tehokkaisiin vähennyskohteisiin eli toimiin, joilla tietyllä rahamäärällä saadaan mahdollisimman suuri päästöjen vähenemä.

Sekä teknologioiden kehityksen että poliittisen päätöksenteon ympäristön arvioiminen kymmeniä vuosia eteenpäin on äärimmäisen vaikea haaste. Tässä työssä on lähestytty ongelmaa haarukoimalla muutamia vaihtoehtoja tekijöiden keskeisiksi arvioimille muuttujille. Teknologian kehitystä on arvioitu kahdella vaihtoehdolla: konventionaalisella peruskehitysarviolla sekä optimistisemmalla vaihtoehdolla, jossa on oletettu lisääntyneet tutkimus- ja kehityspanokset sekä energian käytön tehostaminen. Arviot perustuvat sekä VTT:n aiempaan työhön että tämän työn yhteydessä tehtyyn laajaan Teknologiapolut 2050 -katsaukseen (Savolainen et al. 2008). Suomen energiajärjestelmän kehitystä on arvioitu olettamalla erilaisia vaihtoehtoja keskeisimpien raportin laadintahetkellä avoinna olevien päästöjä vähentävien vaihtoehtojen kehitykselle (mm. mahdollinen ydinvoiman lisärakentaminen). Keskeisenä kehitystä ajavana voimana työssä on oletettu, että kansainvälinen päästökauppa jatkuu, ja päästökaupan hintakehitykselle on oletettu useita vaihtoehtoisia kehityskulkuja.

2. Suomen TIMES-energiajärjestelmämalli

Skenaariotarkastelussa käytettiin VTT:ssä kehitettyä Suomen TIMES-energiajärjestelmämallia, joka pohjautuu IEA:n Energy Technology Systems Analysis Programme -ohjelmassa vuodesta 1997 alkaen kehitettyyn TIMES-mallinnusympäristöön (Loulou et al. 2005). Malli on luonteeltaan lineaariseen optimointiin perustuva ns. osittaistasapainomalli, jossa voidaan kuvata yksityiskohtaisesti suuri määrä erilaisia energiatekniikoita niin energian tuotannon kuin kulutuksen sektoreilla. VTT:n TIMES-mallissa onkin kuvattu varsin suuri määrä eri tekniikoita niin energian tuotannon kuin sen loppukäytön sektoreilla.

Kuvassa 1 on havainnollistettu TIMES-mallin perusrakennetta. Malli sisältää kuvassa esitettyä huomattavasti tarkemman sektorijaottelun, joten malli sopii varsin hyvin muun muassa päästökaupan sektorikohtaisten vaikutusten tarkasteluun. Esimerkiksi teollisuuden kuvaus sisältää erillisinä sektoreina rauta- ja terästeollisuuden, muut perusmetallit, rakennusaineteollisuuden, kemiallisen ja mekaanisen metsäteollisuuden, kemianteollisuuden ja öljynjalostuksen. Myös teollisuuden omat sähkön ja lämmön tuotantoteknologiat on kuvattu vastaavalla tavalla teollisuudenaloittain. Kaukolämpöverkot on puolestaan jaettu mallissa niiden koon ja maantieteellisen sijainnin mukaan viiteen eri alueeseen. Sähkön ja lämmön kuormituskäyrät ovat kymmenjaksoisia.

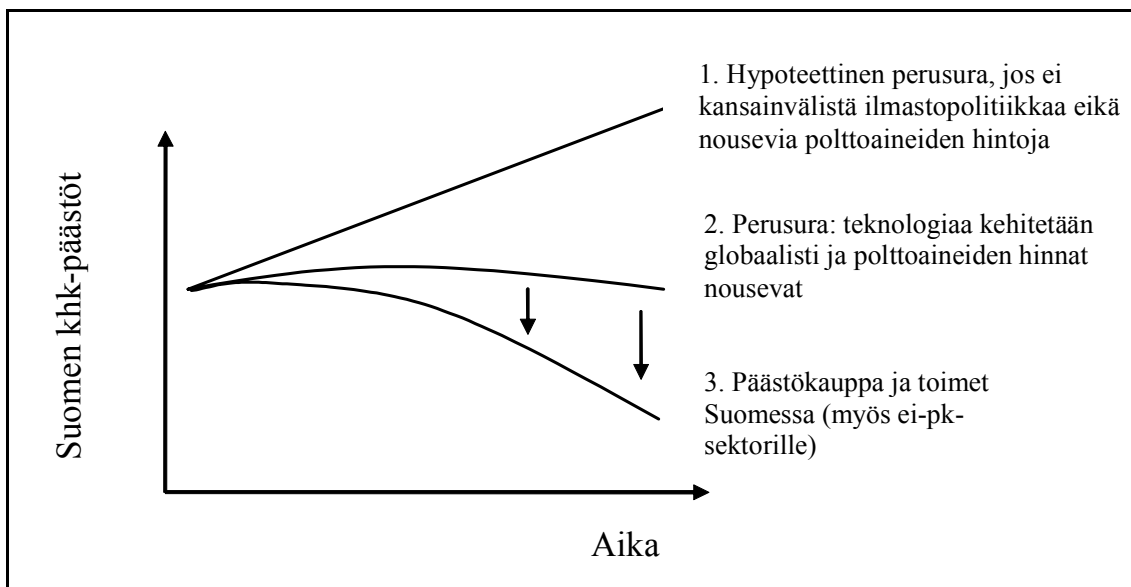


Kuva 1. TIMES-mallin rakenteen yksinkertaistettu periaatteellinen rakennekaavio.

3. Tarkasteltavat skenaariot

3.1 Yleisiä lähtökohtia

Kasvihuonekaasujen päästöihin vaikuttavat voimakkaasti teknologian kehitys, talouden rakenne ja kasvu sekä polttoaineiden hinnat. Ilman päästöjen ohjausta, kun samalla fossiilisten polttoaineiden hinnat pysyvät alhaisina, Suomen päästöt voisivat kehittyä kuvan 2 ylimmän käyrän (1) mukaisesti. Ilmastonmuutoksen hillintä, muiden ympäristö-ongelmien pienentäminen sekä luonnonvarojen käytön tehokkuuden parantamien vaikuttavat teknologioiden kehitykseen. Kun otetaan huomioon nousevat fossiilisten polttoaineiden hinnat ja teknologinen kehitys, Suomen päästöjen kehityksen voidaan olettaa olevan karkeasti kuvan 2 käyrän 2 mukainen. Päästöjen kasvun taittumiseen vaikuttavat mm. liikenteen päästöjen rajoittuminen pitkällä aikavälillä uuden tehokkaamman teknologian kautta ja ydinvoiman käytön lisääntyminen. Ilmaston muuttumisen vaikutuksena tarkastelussa on lisäksi oletettu lämmitysenergian kulutuksen vähenevän, vesivuosien paranevan ja tuulisuuden lisääntyvän.



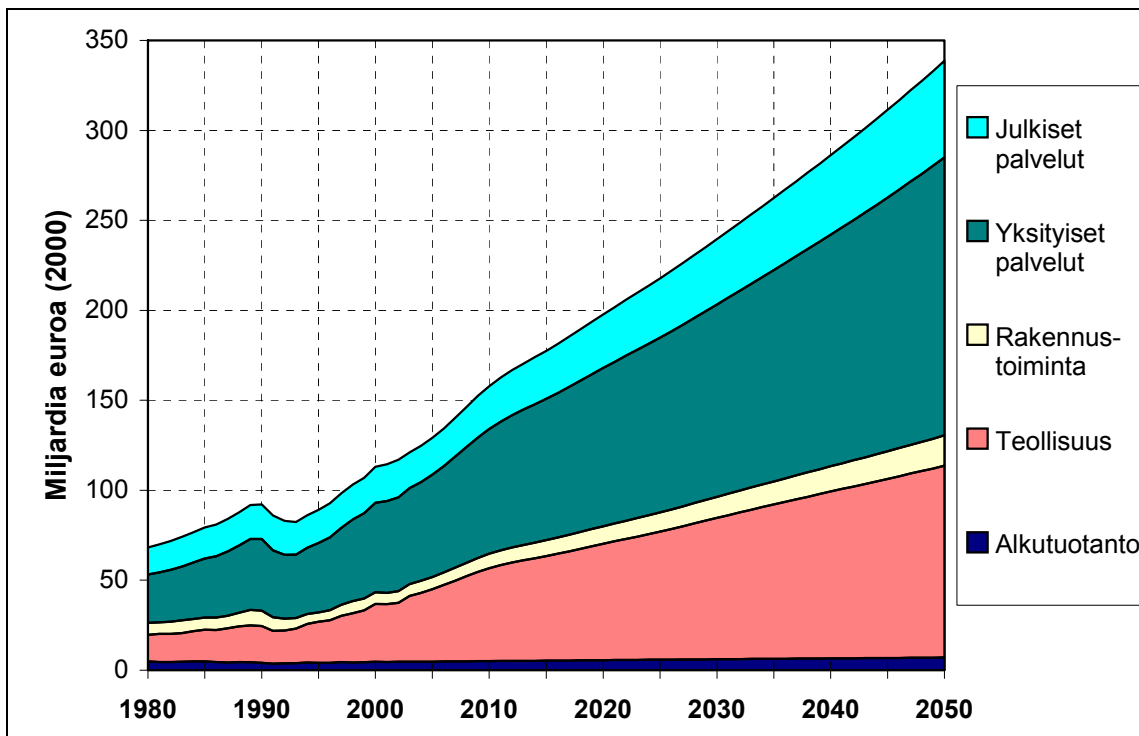
Kuva 2. Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen kehitys erilaisissa skenaarioissa. Käyrä 1 kuvaa kehitystä ilman pyrkimyksiä vähentää päästöjä tilanteessa, jossa fossiilisten polttoaineiden hinnat ovat alhaiset. Käyrä 2 kuvaa tilannetta, jossa maailmanlaajuisesti kehitetään ympäristöystävällistä teknologiaa ja jossa fossiilisten polttoaineiden hinnat kohoavat. Käyrä 3 kuvaa päästöjen kehitystä, jossa on otettu käyttöön lisää päästäjä rajoittavia toimia. Käyrä 2 vastaa tämän raportin Baseline-skenaariota ja käyrä 3 kuvaa erilaisia toimenpideskenaarioita.

Tässä tutkimuksessa tarkastellut varsinaiset päästörajoitustoimet ohjaavat päästöjä käyrän 2 tasosta alaspäin käyrän 3 tasolle. Käyrä 2 muodostaa tässä tutkimuksessa lähtökohdan, josta käytetään nimitystä *baseline* ja kuvissa lyhennystä *base*. Käyrä 2 voidaan nähdä eräänlaisena *with measures* -tyyppisenä skenaariona, jota käytetään lähtökohtana varsinaisten päästövähennysskenaarioiden laskennassa (*with additional measures*).

Kasvihuonekaasujen kustannustehokkaita päästövähennysmahdollisuuksia arvioidaan yleisesti erilaisten teknis-taloudellisten mallien avulla. Sekä teknologioiden kehityksen että poliittisen päätöksenteon ympäristön arvioiminen kymmeniä vuosia eteenpäin on äärimmäisen vaikea haaste. Tässä työssä on lähestytty ongelmaa haarukoimalla muutamia vaihtoehtoja tekijöiden keskeisiksi arvioimille muuttujille. Teknologian kehitystä on arvioitu kahdella vaihtoehdolla: konventionaalisilla peruskehitysarvioilla (*perusskenaariot*) sekä optimistisemmalla vaihtoehdolla, jossa on oletettu lisääntyneet panokset tutkimus- ja kehitystyöhön ja tehokkaamman teknologian käyttöönoton edistämiseen (*tehostusskenaariot*). Arviot perustuvat sekä VTT:n aiempaan työhön että tämän työn yhteydessä tehtyyn laajaan Teknologiapolut 2050 -katsaukseen (Savolainen et al. 2008). Suomen energiajärjestelmän kehitystä on tarkasteltu olettamalla erilaisia kehitysarvioita keskeisimpien raportin laadintahetkellä avoimena olevista päästöjä vähentävistä vaihtoehdoista (mm. mahdollinen ydinvoiman lisärakentaminen). Keskeisenä kehitystä ajavana voimana työssä on oletettu, että kansainvälinen päästökauppa jatkuu, ja päästökaupan hintakehitykselle on oletettu useita vaihtoehtoisia tasoja.

Energiajärjestelmän kehityksen tärkeimpänä veturina toimii TIMES-järjestelmämallissa hyötyenergian² kysyntä. Kysynnän kehitys puolestaan määräytyy mallissa suurelta osin bruttokansantuotteen sektorikohtaisista kehitysarvioista. Nämä arviot perustuvat työ- ja elinkeinoministeriöltä (TEM) vuoden 2008 helmikuussa skenaariotyötä varten saatuihin yksityiskohtaisiin arvioihin. Päivitetty arvio talouskasvusta on hieman korkeampi kuin vuonna 2005 eduskunnalle annetun energia- ja ilmastostrategian pohjana ollut arvio. Kuvassa 3 on esitetty skenaarioissa oletettu talouskasvun kehitys päätoimialaryhmittäin.

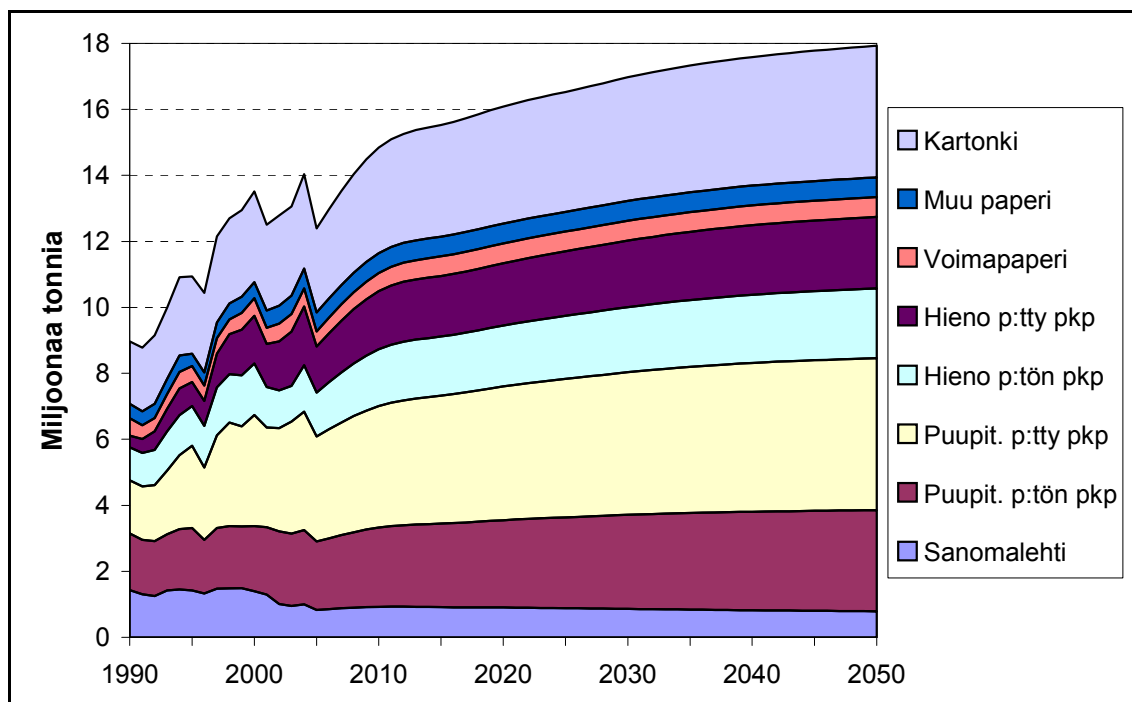
² **Hyötyenergialla** tarkoitetaan sitä energiapalvelujen määrää, joka saadaan energialähteen primäärienergiasta lopullisesti kuluttajan käytettäväksi. Hyötyenergiaa ovat siten esimerkiksi liikenteen henkilö- ja tavaratonnikilometrit sekä lämmitetty rakennustilavuus. Optimoitaessa TIMES-mallilla kustannustehokkaita, eri energiamuotoihin perustuvia tapoja toteuttaa kasvihuonekaasujen päästörajoitukset hyötyenergian tarpeen kehitys pidetään kiinnitettynä kaikissa skenaarioissa samaksi.



Kuva 3. Suomen skenaarioissa käytetty bruttokansantuotteen kehitysarvio vuoteen 2050.

Energian käytön ja päästöjen kannalta keskeisillä sektoreilla talouden kehitysarviot on kuvattu mallissa yksityiskohtaisemmin. Esimerkiksi energiaintensiivisen prosessiteollisuuden toimialoilla on arvioitu suoraan tärkeimpien tuotteiden tuotannon kehitys. Kuten talouskasvuoletukset, myös tuoteryhmittäiset kehitysarviot saatiin työtä varten pääosin työ- ja elinkeinoministeriöltä.

Metsäteollisuus on Suomessa energian kulutuksen kannalta merkittävin yksittäinen toimiala. Paperin ja kartongin tuotanto on heilahdellut viime vuosina tuntuvasti, ja alan tulevaisuuden kehitys Suomessa on epävarma. Tässä työssä käytettyjä arvioita on havainnollistettu kuvassa 4. Kehitysarvion mukaan massan ja paperin tuotannon arvioidaan kasvavan alle prosentin vuodessa vuoden 2020 jälkeen, mikä vastaa metsäteollisuuden kehitysarviota myös ilmastonmuutoksen kansallisessa sopeutumisstrategiassa (Marttila et al. 2005).



Kuva 4. Suomen tarkasteluissa käytetty paperi- ja kartonkitekiteollisuuden tuotannon kehitys-arvio vuoteen 2050.

Laskelmissa käytetyt energian tuontihintojen kehitysarviot perustuvat IEA:n julkaisemiin arvioihin vuodelta 2007 (IEA 2007). Oletukset sähkön tuonti- ja vientihintojen kehityksestä ja vuoden sisäisestä vaihtelusta puolestaan perustuvat VTT:n sähkömarkkinamallin tuottamiin tuloksiin (Kekkonen & Pursiheimo 2005). Päästökaupan vaikutus markkinahintojen kehitykseen on kuvattu mallissa kertoimina, jotka kuvaavat markkinasähkön hintaan sisältyvän keskimääräisen päästöoikeuksien määrän. Myös nämä kertoimet perustuvat sähkömarkkinamallin tuloksiin. Päästökaupan hintatason kytkentää Suomen ulkopuolelta tuodun tai sinne viedyn sähkön hintaan kuvataan siis erillisen pohjoismaisen sähkömarkkinamallin tulosten avulla. Suomen sisäinen hintataso määräytyy TIMES-mallissa kysynnän ja tarjonnan mukaan, mihin siis vaikuttavat myös pohjoismainen sähkön hinta ja siirtokapasiteetit.

Sähkön nettovienti rajoitettiin skenaarioissa vuositasolla nolnaan, eli Suomesta ei voida viedä vuoden aikana enempää sähköä muihin maihin kuin vuoden aikana vastaavasti tuodaan. Tämä rajoitus johtaa ydinvoimaa runsaasti lisättäessä edullisiin sähkön hintoihin Suomen sisäisillä markkinoilla, jolloin sähköistyminen eli fossiilisten polttoaineiden suoran käytön korvaaminen päästöttömällä ydinsähköllä voi muodostua joissakin käyttökohteissa edulliseksi päästöjen vähennystoimeksi.

Perusskenaarioissa käytetyt oletukset tekniikoiden kehittymisestä ja uusien tekniikoiden kustannuksista ovat perusarvioita eli verraten konservatiivisia. Tehostusskenaarioissa on

mukana runsaasti optimistisempia oletuksia päästöjä vähentävästä teknologiasta. Teknologiaoletuksissa on pyritty hyödyntämään Teknologiapolut-selvityksen tuottamia tuoreita arvioita. Huomattavilta osin teknologiatiedot ovat kuitenkin samoja kuin Climtech-ohjelman skenaariotarkasteluissa käytetyt perusarviot (Lehtilä & Syri 2003, Savolainen et al. 2001).

3.2 Ilmaston lämpenemisen oletetut vaikutukset

Ilmastonmuutoksella voi olla kielteisten yleisvaikutusten ohella huomattavia vaikutuksia energiaressurssien saatavuuteen, energian tuotannon infrastruktuuriin, energian kulutukseen sekä eri energialähteiden keskinäiseen kilpailukykyyn. Tarkastelluissa skenaarioissa pyrittiin ottamaan huomioon merkittävimmät todennäköiset vaikutukset energiajärjestelmään vuoteen 2050 mennessä. Näitä vaikutuksia on selvitetty Ilmatieteen laitoksessa tehdyillä monipuolisilla mallilaskelmilla (Tammelin et al. 2002).

Ilmatieteen laitoksen tutkimuksessa analysoitiin ilmaston muutoksen vaikutuksia lämmitysenergian tarpeeseen, vesi- ja tuulivoiman tuotantoon, turvetuotannon satokiertojen määrään ja kausisaantoon, metsien puubiomassan kasvuun. Laskelmat perustuivat Hadley Centre HadCM3 -ilmastomallin tuottamiin tuloksiin kuukausittaisista keskilämpötiloista, sademääristä ja tuulisuudesta (Pope et al. 2000), kun mallilla simuloitiin IPCC:n A2- ja B2-skenaarioita (Nakićenović 2000). Tuulen nopeuksien muutoksista oli käytettävissä tuloksia myös yksityiskohtaisemmasta alueellisesta SMHI-mallista. Vesivoiman muutoksia analysoitiin Suomen ympäristökeskuksen valuma-alueiden malleilla (Vehviläinen & Huttunen 1997).

Selvityksen mukaan ilmaston muutos lisää tuulivoimalaitosten vuosituotantoa nykyiseen verrattuna arviolta 2–10 % vuosina 2021–2050. Arviot otettiin huomioon siten, että tuotannon lisäys on rannikolla 10 % sekä tuntureilla ja merellä noin 5 % vuoteen 2050 mennessä. Vesivoimatuotantoon hyödynnettävien tulovirtaamien arvioitiin kasvavan 7–11 %, ja lisäys kohdistuisi nimenomaan talvikauteen. Vesivoimatuotannon oletettiin tulosten mukaisesti kasvavan vuoteen 2050 mennessä keskimäärin 9 % vuodessa. Turvetuotannon edellytysten arvioitu paraneminen otettiin huomioon tuotannon kustannuskehityksessä. Lämmityksen ominaisenergiankulutuksen arvioitu pieneneminen noin 12 %:lla otettiin skenaarioissa huomioon sekä vanhassa että uudessa rakennuskannassa. Samalla kuitenkin luontainen rakennusten energiatehokkuuden paraneminen arvioitiin hieman konservatiivisemmin. Metsäbiomassan kasvun arvioitua kiihtymistä ei otettu tarkastelussa huomioon arvioihin liittyvien suurten epävarmuuksien vuoksi (mm. mahdolliset tuholaisien vaikutukset), eikä myöskään lauhdevoiman tuotannon hyötysuhteiden heikkenemistä. Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto skenaarioissa käytetyistä oletuksista. Työssä oletettiin vaikutusten kasvavan lineaarisesti vuoden 2050 arvioihin.

Taulukko 1. Arvioidut ilmastonmuutoksen vaikutukset energiajärjestelmään vuosina 2021–2050 verrattuna jaksoon 1961–1990.

Vaikutuksen kohde	Arvioitu ilmastonmuutoksen vaikutus ¹	Skenaarioissa oletettu vaikutus v. 2050
Metsien puubiomassan kasvupotentiaali	15 %	0 %
Jyrsinturpeen tuotantopotentiaali	17–24 %	3 % kustannussäästö
Vesivoimatuotantoon hyödynnettävä valunta	6.6–11.2 %	9 %
Rannikoiden tuulivoimapotentialiaali	3–8 %	7 %
Merituulivoiman potentiaali	3–10 %	5 %
Lämmityksen ominaisenergiakulutus	– 10–14 %	– 12 %
Lauhdevoiman hyötysuhde	– 0.25–1 %	–

¹ Lähde: Tammelin et al. (2002)

3.3 Teknologiakohtaisia oletuksia

3.3.1 Polttoaineiden tuotantoteknologia

Metsähakkeen tuotantopotentiaaleja ja -kustannuksia koskevat oletukset ovat suunnitteen samat kuin Teknologiapolut -katsauksessa esitetyt arviot. Kokonaispotentiaali on vuonna 2050 runsaat 100 PJ. Tehostusskenaarioissa potentiaali on oletettu noin 10 % suuremmaksi ja tuotantokustannukset hieman alemmiksi kuin perusskenaarioissa. Runkopuun mahdollista käyttöä kokonaan energiaksi ei ole otettu skenaarioissa huomioon polttopuupilkkeiden valmistusta lukuun ottamatta. Jos runkopuuta oletettaisiin voitavan käyttää laajemmassa mitassa energiaksi, myös energiapuun kauppa ja metsäteollisuuden raakapuun hankintalähteet pitäisi ilmeisesti mallintaa perusteellisemmin, eikä tätä ole toistaiseksi malliin toteutettu. Mekaanisen ja kemiallisen metsäteollisuuden sivutuotteena syntyvät puupolttoaineet on luonnollisesti otettu mallissa kattavasti huomioon. Kosteaa sivutuotepolttoainetta tehokkaammalla kuivauksella jätelämpöjen avulla voidaan lisäksi saada polttoaineesta jonkin verran lisää energiaa hyötykäyttöön, ja tämä mahdollisuus on myös kuvattu mallissa.

Liikenteen ja työkoneiden biopolttonesteiden tuotantoa ei ole mallissa teknologiakohtaisesti kuvattu, sillä liikennepolttoaineiden hinnat eivät määräydy niinkään tuotantokustannusten mukaan vaan öljytuotteiden maailmanmarkkinahintojen ja verotuksen mukaan. Biopolttonesteiden tuotanto- tai tuontihinta on asetettu jonkin verran vastaavan diesel- tai bensiinipolttoaineen hintaa korkeammaksi mutta tulevaisuudessa alenevaksi. Skenaarioissa on kuitenkin lisäksi oletettu, että puolet biopolttonesteistä tulisi tuottaa Suomessa puupolttoaineista, joten biopolttonesteiden käytön lisäämisen on oletettu pienentävän tässä suhteessa kotimaisen metsäbiopolttoaineen saatavuutta.

Energiajärjestelmämallissa on kuvattu tekniikoita jätepolttoaineiden tuotantoon kaatopaikkakaasusta, maatalousjätteiden käsittelyn tuottamasta biokaasusta, jätepuusta, huonolaatuisimmasta paperijätteestä, muusta palavasta jättejakeesta (lähinnä muovi- ja kumijäte), teollisuusjätteestä (esim. pakkausjätteet) sekä pienessä määrin myös seka- ja ongelmajätteestä, joita voidaan hyödyntää erityisissä jätteenpolttolaitoksissa. Seka- ja ongelmajätteen hyödyntäminen energiaksi on kuitenkin rajoitettu skenaarioissa lähes nykyiselle tasolle. Mallissa kuvattujen jätteenpoltoaineiden käytön maksimipotentiaali on noin 25 PJ, kun vuonna 2006 niiden kokonaiskäyttö oli 9,5 PJ (Tilastokeskus 2008). Kaikista jätteenpoltoaineista (ml. biokaasut) noin 60 % on nykyisin bioperäistä eli uusiutuvaa ja lisäpotentiaalista uusiutuvan osuus on vielä jonkin verran suurempi.

Energiaturpeen vuotuinen tuotanto on tarkastelluissa skenaarioissa rajoitettu alle 100 PJ:n määrään, joka on oletettu kestävä turvetuotannon enimmäismääräksi.

3.3.2 Vesivoima

Vesivoiman lisäämismahdollisuuksia on viime vuosina selvitetty varsin laajasti. Kauppa- ja teollisuusministeriö rahoitti kaksi vuonna 2005 valmistunutta selvitystä, joista toinen koski suur- ja pienvesivoiman potentiaalia ja perustui vesivoimalaitosten omistajille suunnattuun kyselyyn (Energiateollisuus 2005). Kyselyn avulla saatiin tietoja nykyisistä vesivoimalaitoksista ja suunnitelluista hankkeista lisätehon tai lisäenergian saamiseksi. Toinen ministeriön rahoittama selvitys puolestaan keskittyi minivesivoiman potentiaaliin, ja se perustui suurelta osin vuonna 1980 julkaistun koski-inventoinnin tuloksiin (Vesisuunnittelu 2005). Vuonna 2008 valmistui lisäksi uusi, Energiateollisuus ry:n kauppa- ja teollisuusministeriön tuella teettämä selvitys, jonka tavoitteena oli selvittää rakentamiskelpoisen vesivoiman määrä Suomessa ja arvioida vesivoiman lisäämismahdollisuudet vesistöittäin (Vesirakentaja 2008). Tässä skenaariotyössä oletetut suur- ja pienvesivoiman potentiaaliarviot perustuvat uusimpaan Energiateollisuuden teettämään selvitykseen (Vesirakentaja 2008), mutta minivesivoiman potentiaaliarviot perustuvat minivesivoimaselvitykseen. Taulukossa 2 on esitetty yhteenveto selvitysten arvioimista potentiaaleista. Kuten arvioista nähdään, Energiateollisuuden uusin selvitys sisälsi rakentamiskelpoista minivesivoimapotentiaalia vain noin 20 MW, mitä ei voitu pitää tarkastelluissa järkevänä lähtökohtana.

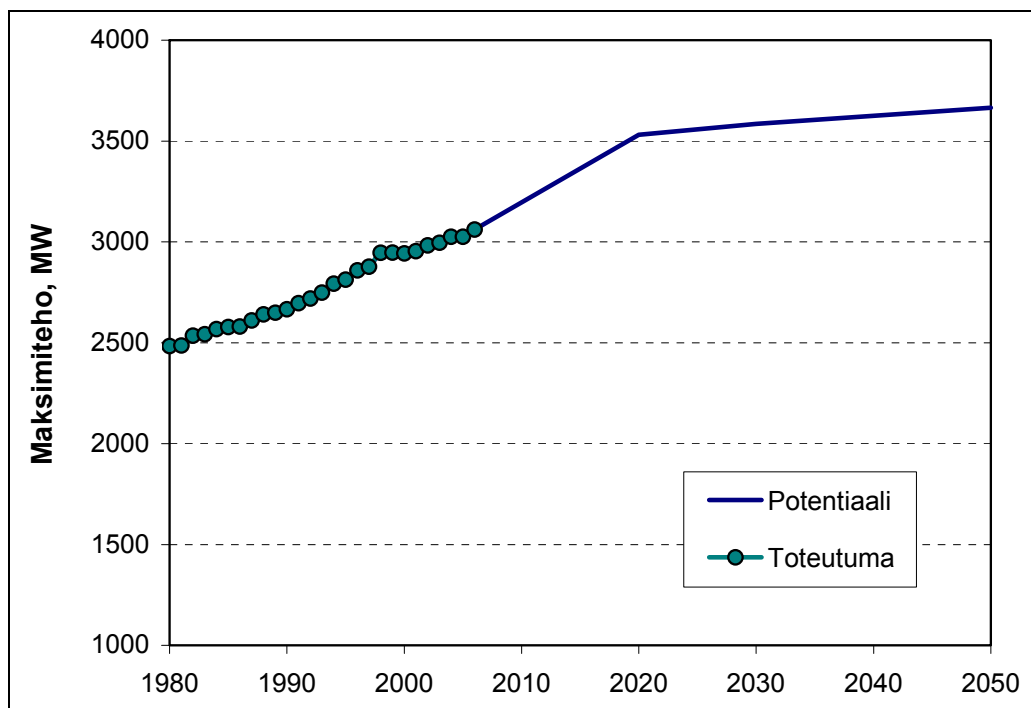
Taulukko 2. Arvioita Suomen vesivoiman tuotannon lisäpotentiaalista eräiden merkittävimpien selvitysten mukaan.

Lähde:	Energiateollisuus (2005)		Vesisuunnittelu (2005)		Vesirakentaja (2008)	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Vesivoimakohde						
Suojelematon						
Taloudellisesti merkittävä	338	389			365	639
Muu pienvesivoima (1–10 MW)	144	392			47	167
Minivesivoima, kannattava	144	1021	130	671	16	56
Minivesivoima, heikosti kannattava			73	298		
Suojelematon yhteensä	626	1802	203	969	428	862
Suojelun alaiset kohteet						
Taloudellisesti merkittävä	564	2050			569	2337
Rajajoet	506	2887			502	2872
Muu pienvesivoima (1–10 MW)	286	2060			211	668
Minivesivoima	148	916	177	830		
Suojeltu yhteensä	1504	7913	177	830	1282	5877
Kaikki yhteensä	2130	9715	380	1799	1710	6739

Skenaarioissa käytetyt perusarvot vesivoiman potentiaalista on esitetty taulukossa 3. Suojeltujen vesistöjen rakentamista ei siis mallinnuksessa sallittu. Taloudellisesti merkittävän vesivoiman ja pienvesivoiman potentiaaliarvot ovat vuoteen 2030 saakka täysin Energiateollisuuden selvityksen mukaisia (yht. 395 MW), ja minivesivoiman potentiaali täysin minivesivoimaselvityksen mukainen kannattava potentiaali (130 MW). Vuoteen 2050 mennessä oletetaan pienvesivoimapotentialin kasvavan tästä enää 30 MW ja minivesivoiman 50 MW. Vuoden 2050 kokonaispotentiaali on siten edelleen hyvin sopusoinnussa kyseisten arvioiden kanssa. Ilmaston lämpenemisen aiheuttaman vesivoimapotentialin kasvun mukaiseksi kokonaistuotantopotentiaaliksi saadaan tällöin oletusten mukaan 16,2 TWh vuonna 2050.

Taulukko 3. Perusarvio vesivoiman lisäyspotentiaalista tarkastelluissa skenaarioissa.

Potentiaali	Yks.	2000	2006	2020	2030	2050
Kapasiteetin lisäpotentiaali	MW					
Taloudellisesti merkittävä				365	365	365
Muu pienvesivoima				0	30	60
Minivesivoima				106	130	180
Yhteensä				471	525	605
Tuotannon lisäpotentiaali	GWh					
Taloudellisesti merkittävä				639	639	639
Muu pienvesivoima					110	220
Minivesivoima				527	671	871
Yhteensä				1166	1420	1730
Kokonaistehopotentiaali	MW	2882	3060	3531	3585	3665
Kokonaistuotantopotentiaali	TWh	12.9	13.1	14.3	14.5	14.9
Ilmastonmuutoslisä	%			4 %	6 %	9 %
Korjattu tuotantopotentiaali	TWh			14.8	15.4	16.2



Kuva 5. Vesivoimakapasiteetin toteutunut kehitys ja laskelmissa oletettu lisäkapasiteetin rakentamispotentiaali vuoteen 2050. Huom. normaalivesivuoden tuotantopotentiaalin kasvu jää kapasiteettipotentiaalin kasvua pienemmäksi.

Vuonna 2003 valmistuneessa Uusiutuvan energian edistämishjelmassa (UEO) tavoitteeksi asetettiin vuoteen 2025 mennessä yhteensä 3 TWh:n lisäys vesivoiman tuotannossa vuoteen 2001 verrattuna. Tähän verrattuna skenaarioissa oletettu potentiaali on huomattavasti pienempi, sillä oletusten mukaan koko vesivoiman lisäyspotentiaali on vuoteen 2030 mennessä 1,4 TWh ja vuoteen 2050 mennessä 1,7 TWh. Ilmastonmuutoksella korjattunakin vuoden 2030 kokonaispotentiaali jää UEO:n vuodelle 2025 asettaman tavoitteen alle. Tehostusskenaarioissa oletukset ovat muuten samat, mutta vuosina 2030–2050 minivesivoiman lisäpotentiaali on oletettu 20 MW suuremmaksi. Kuvassa 5 esitetään vesivoimakapasiteetin toteutunut kehitys ja laskelmissa oletettu kapasiteetti.

Vesivoimalaitosten investointikustannuksia koskevista oletuksista keskeisimpiä ovat minivesivoiman kustannukset, sillä suur- ja pienvesivoiman koko oletettu lisäyspotentiaali voidaan arvioida joka tapauksessa kannattavaksi. Minivesivoimalaitosten investointikustannuksiksi on oletettu kannattavien kohteiden osalta 1 600 €(2005)/kW, ja heikommin kannattavissa kohteissa 2 000 €/kW. Oletukset ovat sopusoinnussa monissa eri selvityksissä esitettyjen arvioiden kanssa (esim. Vartiainen et al. 2002). Keskimääräiseksi huipunkäyttöajaksi on oletettu noin 4 000 h/a, mikä on selvästi vähemmän kuin pienvesivoimaselvityksessä (noin 5 000 h/a) ja heikentää siten minivesivoiman kannattavuutta.

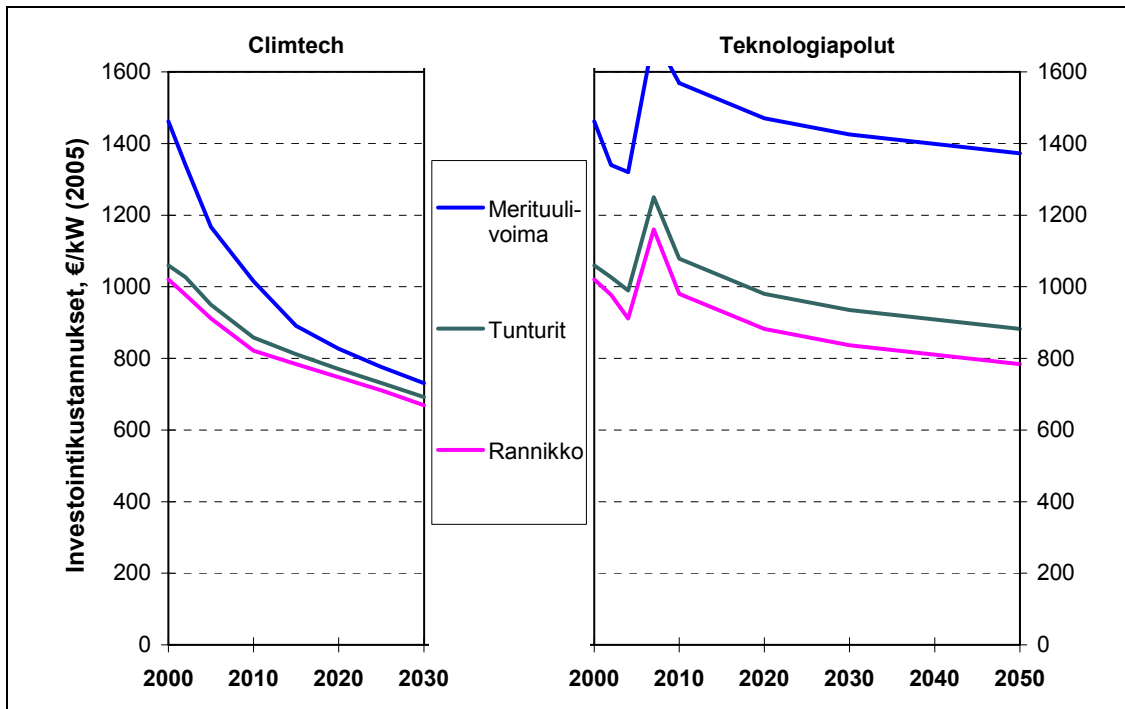
3.3.3 Tuulivoima

Suomen tuulivoimapotentialista käytettiin työssä samoja oletuksia kuin Teknologia-polut-selvityksessä (Savolainen et al. 2008). Selvityksen varovaista kehitysarviota käytettiin perusskenaarioissa ja optimistista kehitysarviota tehostusskenaarioissa. Perusarviossa maksimikapasiteetti on siten 4 300 MW vuonna 2050, josta 2 100 MW merituulivoimaa. Tehostusskenaarioissa maksimikapasiteetti on vastaavasti 7 600 MW, josta 4 000 MW on merituulivoimaa. Tehostusskenaarioiden potentiaali on merituulivoiman osalta 500 MW suurempi kuin raportissa esitetty luku, mutta raportissa huomautetaankin merituulivoiman tapauksessa, että optimistisessä kehitysarviossa potentiaali voidaan arvioida vielä paljon suuremmaksi.

Kuvassa 6 on esitetty vertailu tuulivoimalaitosten investointikustannuksista VTT:n vuonna 2002 ja 2008 tekemien arvioiden välillä. Skenaarioissa on käytetty kuvassa esitettyjä Teknologia-polut-selvityksen optimistisempia kehitysarvioita. Kuten kuvasta voidaan nähdä, tuulivoiman investointikustannusten arviot ovat nousseet viime vuosina tuntuvasti, mikä johtuu suurelta osin tuulivoimamarkkinoiden ylikuumenemisestä viime vuosina, mutta osittain myös raaka-aineiden hintojen noususta. Toisaalta myös joidenkin raaka-aineiden hintojen voimakas nousu johtuu kapasiteetin riittämättömyydestä. Tämän vuoksi skenaarioissa ei käytetty pessimistisempää kehitysarviota, sillä on odotettavissa että kohonneiden hintojen vuoksi voimalaitosten ja raaka-aineiden tuotantokapasiteettia rakennetaan lisää, jolloin hinnat kääntyvät reaalisesti selvään laskuun. Oletusten mukaan rannikotuu-voimalaitosten investointikustannukset olisivat käänteestä huolimatta vuonna 2030 vielä noin 840 €(2005)/kW, joka on noin 25 % korkeampi kuin Climtech-ohjelmassa esitetty arvio, 670 €(2005)/kW. Merituulivoimassa vastaava kustannusero näiden arvioiden välillä on jopa 95 %. Tuulivoiman kustannusoletukset olivat näistä syistä samat sekä perus- että tehostusskenaariossa.

VTT:ssä tehtyjen selvitysten mukaan tuulivoimatuotannon lisääminen aiheuttaa **vara- ja säättövoimakapasiteetin** lisätarvetta vasta kun tuulivoimakapasiteetin kokonaismäärä nousee yli 2 000 MW:n eli tuotanto noin 5 %:iin sähkön kokonaistuotannosta. Tämä on otettu huomioon mallilaskelmissa seuraavasti:

- Siltä osin kuin tuulivoimatuotanto alittaa 5 % sähkön kokonaistuotannosta, tuulivoimaa oletetaan tuotettavan huippukulutuksen aikana laitosten vuosittaisella keskiteholla (tyypillisesti 25–35 % nimellistehosta);
- Siltä osin kuin tuulivoimatuotanto ylittää 5 % sähkön kokonaistuotannosta, tuulivoimaa oletetaan tuotettavan huippukulutuksen aikana vain neljänneksellä vuoden keskitehosta (eli alle 10 %:n teholla).



Kuva 6. Tuulivoimalaitosten investointikustannusten kehitysarvioita Climtech-hankkeen mukaan vuoteen 2030 (Peltola 2002) sekä Teknologiapolut-hankkeen mukaan vuoteen 2050 (Savolainen et al. 2008). Kaikki kustannukset vuoden 2005 euroina.

3.3.4 Ydinvoima

Ydinenergialain mukaan kunkin uuden ydinvoimalaitoksen rakentaminen edellyttää valtioneuvoston periaatepäätöstä siitä, että laitoksen rakentaminen on yhteiskunnan kokonaisedun mukaista. Näiden lisärakentamista koskevien periaatepäätösten osalta skenaariolaskelmissa käytettiin kolmea erilaista oletusta, jotka olivat suunnilleen samanlaisia kuin Teknologiapolut-selvityksessä esitetyt *varovainen* ja *optimistinen* kehitysarvio.

Skenaariossa käytetyt ydinvoiman lisäämismahdollisuuksia koskevat oletukset ilmenevät taulukosta 4. Skenaarioiden B- ja C-varianteissa (optimistiset skenaariot) oletetaan siis ydinvoimaa voitavan lisätä varsin runsaasti, minkä yhtenä tarkoituksena on tuottaa karkea arvio siitä, kuinka paljon ydinvoimaa Suomen sähköntuotantojärjestelmään voitaisiin taloudellisesti lisätä. Laaja kapasiteetin lisäys edellyttäisi uusilta ydinvoimalaitoksilta luonnollisesti tehon säädettävyyttä. Suurin osa lisäyksestä on kuitenkin tällä hetkellä käytössä olevien laitosten korvausinvestointeja.

Taulukko 4. Oletettu ydinvoimakapasiteetin maksimipotentiali tarkastelluissa skenaarioissa. Huom. Loviisan vanhan laitoksen on oletettu poistuvan käytöstä vuonna 2030.

MW Vuosi	Perusskenaariot		Tehostusskenaariot	
	Varovainen (A)	Optimistinen (B)	Varovainen (A)	Optimistinen (C)
2020	4 260	5 860	4 260	5 860
2030	4 880	6 400	4 880	9 000
2050	4 880	7 900	4 880	11 000

Uusien ydinvoimalaitosten oletettiin olevan perusskenaarioissa Olkiluoto-3:n kaltaisia moderneja kevytvesireaktoreita. Tehostusskenaarioiden ydinvoimavarianteissa oletettiin lisäksi vuoden 2025 jälkeen voitavan rakentaa neljännen sukupolven kaasujäähdytteisiä kuulakekoreaktoreita, jotka tulevat arvioiden mukaan kilpailukykyisiksi huomattavasti kevytvesireaktoreita pienemmässä laitoskoossa (200–500 MW). Uudentyyppisiä reaktoreita voidaan kuitenkin rakentaa korkeintaan 2 000 MW vuoteen 2050 mennessä.

Kevytvesireaktoreiden investointikustannusten oletettiin olevan 2 300 €/kW, eli samansuuruisia kuin Teknologiapolut-selvityksessä. Tämä on lähes 30 % korkeampi kuin esimerkiksi OECD:n energijärjestöjen (IEA ja NEA) toimesta laaditussa, vuonna 2005 valmistuneessa kustannuskatsauksessa esitettyjen EU-maiden, USA:n ja Kanadan uusien laitosten kustannusarvioista laskettu keskiarvo, noin 1 800 €(2003)/kW (IEA 2005). Se on myös arviolta noin 15 % suurempi kuin Olkiluoto-3:n investointikustannukset. Kuulakekoreaktoreiden kustannukset on arvioitu noin 30 % alhaisemmiksi.

3.3.5 Teollisuuden päästöjä vähentävä teknologia

Suomen TIMES-energiajärjestelmämallissa on kuvattu energiaintensiivisen teollisuuden tärkeimmät tuotantoprosessit teknologiakohtaisesti. Malli sisältää muun muassa seuraavien keskeisten tuotantoteknologioiden kuvauksen:

- Paperimassan valmistus puusta tai kierrätyspaperista (noin 15 eri teknologiaa)
- Paperin valmistus paperimassasta ja täyteaineista (yli 10 teknologiaa)
- Raudan ja ferrokromin valmistusteknologiat
- Teräksen valmistus raudasta, romusta ja ferrokromista (6 eri teknologiaa)
- Sementin ja poltetun kalkin valmistus kalkkikivistä (neljä teknologiaa).

Työssä mallin kuvaukseen lisättiin muun muassa seuraavat uudet teknologiavaihtoehdot Teknologiapolut-katsauksessa kootun taustamateriaalin pohjalta:

- Mekaanisen massan valmistuksessa uudet jauhinkonstruktio ja biotekniset menetelmät
- Paperin valmistuksessa tuotteiden ohentaminen
- Teräksen valmistuksessa suorapelkistysprosessi ja sulapelkistysprosessi (Corex)
- Teräksen valmistuksessa masuunikaasukäyttöinen kombivoimalaitos
- Sementin valmistuksessa siirtyminen maakaasun tai biopolttoaineiden käyttöön
- Sementin valmistuksessa CO₂-talteenotto-prosessi
- Paperin valmistuksessa tuotteiden ohentaminen.

Näiden prosessiteknologioiden lisäksi mallissa on kuvattu erillisiä energian käytön tehostustoimia kaikilla teollisuudenaloilla. Tehostustoimien potentiaaliarviot ja kustannukset perustuvat pääosin Climtech-ohjelmassa tehtyihin selvityksiin ja ilmastostrategian taustatyöhön (Savolainen et al. 2001, Ohlström & Savolainen 2005). Tehostusskenaarioissa tehostustoimien kustannusten oletettiin laskevan reaalisesti 15 % vuoteen 2050 mennessä.

Tarkastelluissa perusskenaarioissa rajoitettiin malliin lisätyt uudet mekaanisen massan jauhinkonstruktioiden teknologiat pelkästään tehostusskenaarioihin, sillä lähtötietojen mukaan tekniikat olisivat niin kannattavia, että niiden pitäisi joka tapauksessa tulla mahdollisimman nopeasti laajaan käyttöön. Samoin paperin valmistuksessa tuotteiden ohentamisella saatavat edulliset energiansäästöt rajattiin tehostusskenaarioihin. Esitetyt arviot näiden hyvin edullisten tekniikoiden nopeasta kaupallistumisesta saattavat siis olla varsin optimistisia. Perusskenaarioissa metsäteollisuuden tehostustoimet sisältävät tällöin kuitenkin kaikki erikseen mallinnetut säästötekniikat, jotka sisältävät konservatiivisempia arvioita myös mekaanisen massan valmistuksen tehostusmahdollisuuksista. Näiden lisäksi mukana ovat mm. biotekniset keinot mekaanisen massan valmistuksessa. Tehostusskenaarioissa on näiden lisäksi käytettävissä uudet jauhinkonstruktio (jotka vähentävät erillisten säätötoimien potentiaalia) ja tuotteiden ohentaminen.

Teräksen valmistuksessa uusien suora- ja sulapelkistysmenetelmien markkinaosuus rajoitettiin perusskenaariossa korkeintaan 20 %:iin vuonna 2050, mutta tehostusskenaarioissa niille sallittiin 70 %:n markkinaosuus vuonna 2050. Sekä perus- että tehostusskenaarioissa on käytettävissä lisäksi erilliset tehostusinvestoinnit, joilla voidaan parantaa konventionaalisten prosessien (BOF, EAF) energiatehokkuutta.

3.3.6 Asumisen ja palvelujen energiateknologia

Asumisen energian käyttö koostuu pääasiassa asuinrakennusten ja lämpimän käyttöveden lämmityksestä sekä kotitalouksien valaistuksen ja sähkölaitteiston sähkön kulutuksesta.

Tarkastelluissa skenaarioissa rakennusten lämmityksen tehostamispotentiaalit ja kustannukset perustuvat Climtech-ohjelman selvityksiin (Savolainen et al. 2001). Tehostustoimia on otettu huomioon sekä uudisrakentamisessa että korjausrakentamisessa. Varsinaisten lämmitysjärjestelmien teknis-taloudelliset oletukset perustuvat pääosin VTT:n aiempiin selvityksiin (esim. Helynen et al. 2002).

Kotitaloussähkön kulutus on mallinnettu laiteryhmittäin. Kulutuksen jakautuminen Baseline-skenaariossa perustuu Climtech-ohjelman selvitykseen (Korhonen et al. 2002), ja se on esitetty taulukossa 5. Jakauman on oletettu säilyvän ennallaan vuoden 2030 jälkeen. Kunkin laiteryhmän kulutukselle on mallinnettu tehostustoimia, joiden potentiaalit ja kustannukset perustuvat niin ikään pääosin Climtech-ohjelman selvityksiin.

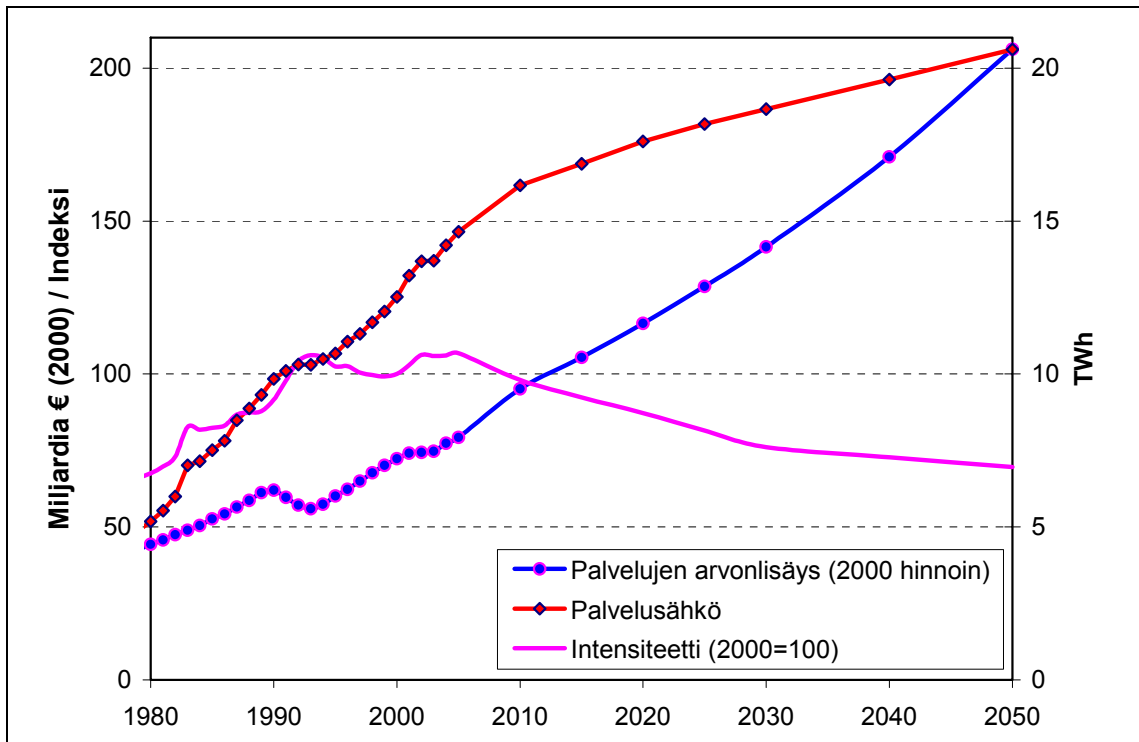
Taulukko 5. Kotitaloussähkön oletettu jakautuminen eri kulutuskohteisiin.

	2000	2010	2020	2030
Sähköliedet	9.2 %	8.5 %	8.1 %	7.7 %
Muu ruoanlaitto	3.6 %	4.4 %	4.4 %	4.4 %
Valaistus	17.9 %	17.8 %	17.5 %	17.2 %
LVI ja puhtaanapito	16.0 %	14.1 %	14.0 %	14.0 %
Kylmälaitteet	24.5 %	20.0 %	19.0 %	18.2 %
Saunat	9.1 %	10.3 %	10.3 %	10.2 %
Muut laitteet	19.8 %	24.8 %	26.7 %	28.2 %

Tehostusskenaarioissa kaikkien tehostustoimien kustannuksien on oletettu alenevan reaalisesti 15 % vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi tehostusskenaarioissa valaistuksen tekniikat on mallinnettu teknologiakohtaisesti (hehkulamput, eri loistelampputyypit, halogeenilamput ja LED-valaisimet), ja erilliset säästötoimet on poistettu. Valaistustekniikoiden potentiaalit ja kustannukset perustuvat Teknologiapolut-selvityksen tuottamiin ja kokoamiin tietoihin (Savolainen et al. 2008).

Palvelusektorin rakennuskannan lämmitysenergiankulutus on mallinnettu samoin periaattein kuin asuinrakennusten lämmitys. Lämmityksen tehostamispotentiaalit ja kustannukset perustuvat Climtech-ohjelman selvityksiin (Savolainen et al. 2001).

Palvelusektorin merkitys on kasvanut viime vuosina tuntuvasti sähköenergian kokonaiskulutuksessa ja sitä kautta välillisesti myös sähköntuotannon päästöissä. Palvelujen sähkön kulutus on kasvanut 2000-luvulla runsaat 3 % vuodessa. Kulutuksesta valaistuksen osuus on varsin suuri, lähes 30 %. LVI:n osuus on arviolta noin 30 %, kylmälaitteiden noin 7 %, toimistolaitteiden 7 %, ulkovalaistuksen noin 6 % ja muiden laitteiden runsaat 20 %. Kuvassa 7 on esitetty sekä palvelujen arvonlisäyksen että sähkön kokonaiskulutuksen kehitys Baseline-skenaariossa vuoteen 2050.



Kuva 7. Palvelujen arvonlisäys ja sähkön kulutus perusuraskenaariossa vuoteen 2050.

Järjestelmämallissa kunkin laiteryhmän kulutukselle on mallinnettu tehostustoimia, joiden potentiaalit ja kustannukset perustuvat pääosin Climtech-ohjelman selvityksiin (esim. Korhonen et al. 2002). Tehostusskenaarioissa kaikkien tehostustoimien kustannuksien on oletettu alenevan reaalisesti 15 % vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi tehostusskenaarioissa valaistuksen tärkeimmät tekniikat on mallinnettu teknologiakohtaisesti, ja erilliset valaistuksen säästötoimet on tällöin poistettu teknologiavalikoimasta.

3.3.7 Liikenteen ajoneuvoteknologia

Liikenteen ajoneuvoteknologian kehitykseen liittyy pidemmällä tähtäyksellä varsin suuria epävarmuuksia. Lupaavia kehittyviä tekniikoita ovat mm. hybridi- ja sähköautotekniikat, joista etenkin hybridi-autot ovat jo saavuttamassa markkinaosuutta. Autonvalmistajat kehittävät näiden lisäksi aktiivisesti myös polttokennoajoneuvoja, jotka tulevat joidenkin arvioiden mukaan todennäköisimmin saamaan pidemmällä tähtäimellä valtateknologian aseman.

Konventionaalisiin moottoritekniikoihin (otto- ja dieselmoottorit) perustuvien ajoneuvojen ominaiskulutusten oletettiin skenaarioissa myös pienenevän tuntuvasti vuoden 2010 jälkeen, kun kilpailu energiataloudellisempien hybridi-ajoneuvojen kanssa kiristyy. Uusien henkilöautojen keskimääräisen polttoainekulutuksen oletettiin alenevan tasolle 5 l/100 km

noin vuonna 2020. Dieselhenkilöautojen osuuden oletettiin nousevan vuoteen 2020 mennessä noin 24 %:iin henkilöautojen kokonaissuoritteesta, kun se oli vielä vuonna 1995 vain 12 %. Näiden oletusten tuloksena saatu liikenteen energiankäytön perusura vastaa varsin hyvin vuonna 2005 laaditun ministeriöiden WM-skenaarion mukaisia kehitysarvioita.

Vedyn käyttöön perustuva polttokennoteknologia lienee pidemmällä tähtäimellä sähköautojen ohella merkittävin päästöjä vähentävä ajoneuvoteknologia. Jommankumman näistä pitäisi siten todennäköisimmin tulla kilpailukykyiseksi, jotta liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä voitaisiin todella merkittävästi vähentää. Valtaosaltaan biopolttonesteisiin perustuva ajoneuvokanta edellyttäisi niin suurta biopolttoainetuotantoa, että sellaista ei katsottu aiheelliseksi olettaa tarkastelluissa skenaarioissa.

Skenaarioissa päädyttiin käyttämään oletusta, jonka mukaan vuoden 2020 jälkeen polttokennoajoneuvot saavuttavat kilpailukykyisen kustannustason, jolloin uusista ajoneuvoista suurin osa tulisi olemaan polttokennoautoja. Samalla kuitenkin myös sähköautot kehittyisivät kilpailukykyisiksi erityisesti taajamien lyhyiden matkojen henkilö- ja pakettiautoliikenteessä. Näiden oletusten ansiosta liikenteen päästöjä voidaan skenaarioissa vähentää vuoteen 2050 mennessä hyvin merkittävästi ilman laajamittaista kotimaista biopolttonesteiden tuotantoa. Vedyn kuljetuksen ja jakelun varsin korkeat lisäkustannukset on otettu karkeasti arvioituna tarkastelussa huomioon.

EU:n direktiivien mukainen biokomponenttien lisääminen liikennepolttonesteisiin on skenaarioissa näin ollen mukana pääosin lyhyen ja keskipitkän aikavälin päästöjen vähennystoimena. Tarkasteluaikavälin loppupuolella biopolttonesteiden käyttö keskittyy maatalouden ja rakennustoiminnan työkoneisiin. Kulutuksen väheneminen voidaan tällöin kompensoida biokomponenttien nettotuontia vähentämällä.

3.3.8 Hiilidioksidin talteenotto ja loppusijoitus

Hiilidioksidin talteenotto ja loppusijoitus on eräs lupaava fossiilisten polttoaineiden käytön hiilidioksidipäästöjä vähentävä teknologia. Hiilidioksidi voidaan ottaa talteen joko polton savukaasuista tai jo ennen polttoa esimerkiksi kiinteän polttoaineen kaasutuksen yhteydessä, jolloin poltettava tuotekaasu on pääosin vetyä. Mallissa on kuvattu CCS-teknologia seuraavien tekniikoiden yhteydessä:

- Hiili- ja turvelauhdevoima IGCC-teknologialla
- Suuren kokoluokan maakaasukombi-CHP-laitos
- Vedyn valmistus maakaasusta höyryreformoinnilla
- CO₂-erotus BOF-teräksen valmistuksen savukaasuista
- Sementin valmistus hiiltä polttavalla klinkkeriuunilla.

Oletukset CCS-teknologioiden kustannuksista (Taulukko 6) ja teknisestä suorituskyvystä perustuvat kansainvälisistä lähteistä koottuihin arvioihin. Hiilidioksidin loppusijoituksen kustannusarvio perustuu laskennalliseen 1 000 km:n kuljetusmatkaan (Pohjanmeri) ja arvioihin varsinaisen loppusijoituksen kustannuksista.

Taulukko 6. CCS-teknologian lisäkustannuksia koskevia oletuksia eri tekniikoille verrattuna vastaaviin tekniikoihin ilman CCS-teknologiaa. Huom. hyötysuhteen heikentymisen aiheuttama polttoainekustannusten kasvu on mallissa endogeeninen, joten sitä ei ole taulukossa mukana.

	yks. tuot. yks.	Lisäinvestointi- kustannukset EUR 2005		Lisäkäyttö- kustannukset EUR 2005		Loppusijoitus- kustannukset EUR 2005 / Mg	
		2020	2050	2020	2050	2020	2050
		IGCC-lauhdevoima, hiili/turve	kWe	430	390	9	9
Maakaasukombi-CHP	kWe	430	290	13	13	12	11
Vedyn valmistus maakaasusta	kWp	80	80	14	13	12	11
BOF-teräksen valmistus	kWp	520	470	15	15	12	11
Sementin valmistus	Mg	290	270	1.5	1.1	12	11

3.4 Yhteenveto tarkastelluista skenaarioista

Perusskenaarioissa lähtökohtana on melko konservatiivinen Baseline-skenaario, jonka mukaisten päästöjen vähentämistä tarkastellaan eri päästöoikeuksien hintatasoilla. Perusskenaarioissa uuden teknologian ja energian käytön tehostustoimien potentiaalit on arvioitu kohtuullisen varovaisesti, ja joidenkin uusien tekniikoiden käyttöönottoa on rajoitettu (esimerkiksi mekaanisen massan jauhinkonstruktio, LED-valaisimet).

Tehostusskenaarioissa monien uusien ja kehittyvien tekniikoiden potentiaalit on arvioitu suuremmiksi ja kustannukset edullisemmin kehittyviksi. Kaikki malliin sisältyvät uudet teknologiat ovat tällöin tarkastelussa mukana. Lisäksi tehostusskenaarioissa oletetaan erikseen mallinnettujen energian käytön tehostustoimien kustannuksien alenevan 15 % vuoteen 2050 mennessä. Tehostusskenaarioita on tarkasteltu samoilla eri oletuksilla kansainvälisestä päästöoikeuksien kaupasta ja sen hintatason kehityksestä.

Kumpaakin skenaariosarjaa tarkastellaan lisäksi erilaisin oletuksin **ydinvoiman** lisärakentamismahdollisuuksista. **Varovaisissa ydinvoimaskenaarioissa** (A-skenaariot) voidaan rakentaa Olkiluoto-3:n jälkeen vain yksi uusi ydinvoimalaitos vuoteen 2030 mennessä Loviisan vanhan laitoksen poistuessa käytöstä. **Optimistisissa ydinvoimaskenaarioissa** (B- ja C-skenaariot) uusia kevytvesireaktoritekniikkaan perustuvia ydinvoima-

laitoksia voidaan rakentaa melko vapaasti. Ensimmäinen uusi laitos voi valmistua jo vuoteen 2020 mennessä ja sen jälkeen uutta kapasiteettia voi valmistua korkeintaan 6 400 MW:n kokonaistehoon asti vuonna 2030 ja 7 900 MW:n määrään vuonna 2050 (B-tapaukset). Tehostusskenaarioissa (C) voidaan kevytvesireaktoreiden ohella rakentaa myös pienemmän kokoluokan kuulakekoreaktoreita vuoden 2025 jälkeen.

Tarkastellut skenaariot ovat siis seuraavat:

- Perusskenaario A: konventionaalinen teknologiakehitys ja varovaiset ydinvoima-arviot, ydinvoimakapasiteetin yläraja 4 880 MW v. 2050
- Perusskenaario B: konventionaalinen teknologiakehitys ja optimistisemmat ydinvoima-arviot, ydinvoimakapasiteetin yläraja 7 900 MW v. 2050
- Tehostusskenaario A: voimakkaampi teknologiakehitys ja varovaiset ydinvoima-arviot (A), ydinvoimakapasiteetin yläraja 4 880 MW v. 2050
- Tehostusskenaario C: voimakkaampi teknologiakehitys ja optimistisimmat ydinvoima-arviot, ydinvoimakapasiteetin yläraja 11 000 MW v. 2050.

Tällä hetkellä Suomen käytössä oleva ydinvoiman sähköntuotantokapasiteetti on 2 700 MW, ja rakenteilla olevan Olkiluoto-3:n kapasiteetti tulee olemaan 1 600 MW.

Lisäksi työssä on tehty herkkyystarkastelu energian käytön tehostusinvestointien tuotto-vaatimuksen osalta. Herkkyystarkastelussa laskettiin perusskenaariot (varovaisin ydinvoimaoletuksin) uudelleen olettaen, että kaikilla sektoreilla tehostusinvestointien tuotto-vaatimukset ovat tuntuvasti alempia. Oletetut säästöinvestointien tuottovaatimukset on esitetty luvussa 5.

Kaikkia yllä mainittuja skenaariosarjoja on tarkasteltu olettaen kaikkia kasvihuonekaasuja koskeva kansainvälinen päästökauppa. Käytännössä ns. ei-päästökauppasektori pysynee suurelta osin päästökaupan ulkopuolella, ja siihen kohdistetaan muunlaisia politiikkatoimia, kuten päästö- tai tehokkuusstandardeja, veroja ja tukia. Koska päästöjen vähennystoimia kannattaa kuitenkin tehdä kaikilla sektoreilla samaan marginaalikustannusten tasoon saakka, on mielekästä olettaa tällainen teoreettinen kaikki päästölähteet kattava päästökauppa, jotta voidaan tarkastella miten päästöjen vähennystoimet voitaisiin kohdistaa kustannustehokkaasti.

Päästöoikeuksien hintatasoina vuosina 2045–2054 tarkasteltiin hintoja 20 €, 40 €, 60 € ja 80 € tonnia hiilidioksidiekvivalenttia kohti (ks. taulukko 7). **Vuoteen 2014 saakka hinnan oletettiin kaikissa tapauksissa olevan 20 €/t, ja sen jälkeen hinnan oletettiin kehittyvän lineaarisesti vuosien 2015–2045 välillä.** Näistä oletuksista johtuen erot skenaarioiden tuloksissa ovat varsin pieniä tarkasteluajavälin alussa, mutta kasvavat

vähitellen myöhempinä tarkasteluvuosina. Kussakin skenaariosarjassa tuloksia verrataan ns. Baseline-skenaarioon, jossa ei oleteta päästökauppaa, mutta muutoin oletetaan nykyisten politiikkatoimien olevan voimassa (ns. *with measures* -skenaario).

Taulukko 7. Yhteenveto tarkastelluista skenaariosarjoista.

Skenaariovariantit	Baseline	Perusskenaariot	Tehostusskenaariot
Polttoaineiden hintakehitys maailmanmarkkinoilla	Varovaisen nouseva, IEA 2007:n mukainen	Varovaisen nouseva, IEA 2007:n mukainen	Varovaisen nouseva, IEA 2007:n mukainen
Panostus teknologian kehittämiseen ja käyttöönottoon	Nykytasoa vastaava, "konventionaalinen"	Nykytasoa vastaava, "konventionaalinen"	Tuntuvasti lisääntyneet panostukset
Päästökauppatapaukset (arvot viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti)	Nyky politiikka ilman päästökauppaa	20 €/tonni 40 €/tonni 60 €/tonni 80 €/tonni	20 €/tonni 40 €/tonni 60 €/tonni 80 €/tonni
Ydinvoimaoletukset		Varovainen (A) Optimistinen (B)	Varovainen (A) Optimistinen (C)
Säästötoimien tuottovaatimus		Perustuotto Alhainen tuotto	Perustuotto

4. Tuloksia

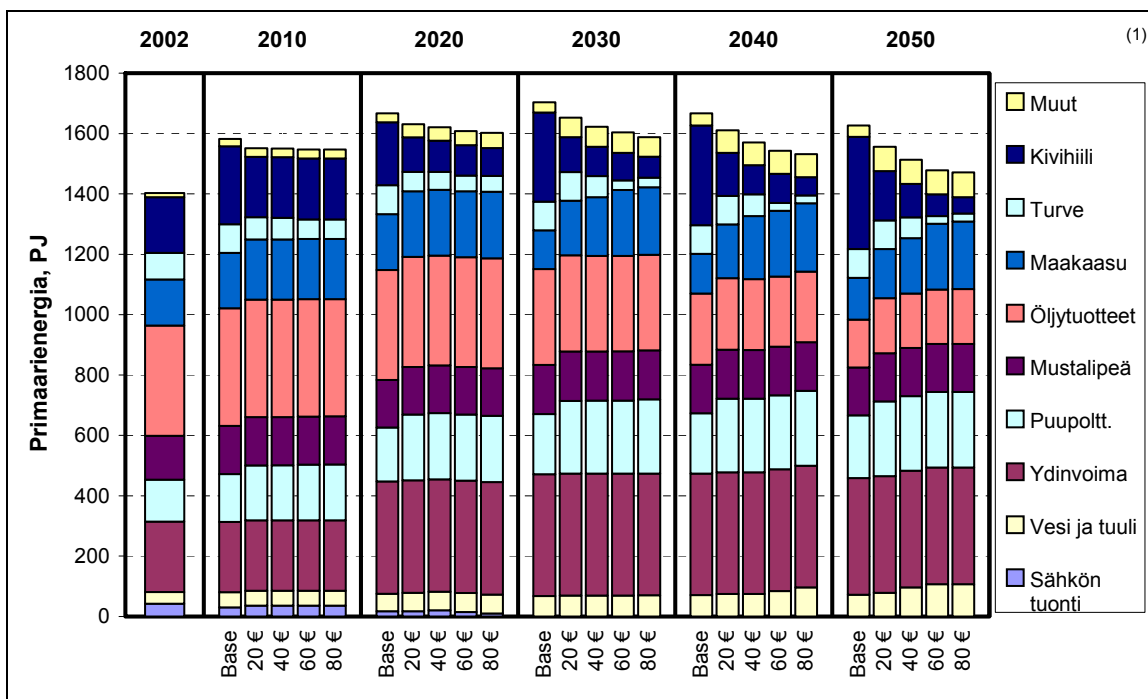
4.1 Energian kokonaiskulutus

Suomen primaarienergian kokonaiskulutus nousee perusskenaarioiden Baseline-tapauksessa (ei päästökauppaa) korkeimmillaan noin 1 700 PJ:n määrään vuonna 2030. Tästä huipulukumasta se laskee hiljalleen perusurassa noin 1 600 PJ:n tasolle vuonna 2050. Primaarienergian kulutuksen kääntymiseen laskuun vaikuttaa osaltaan oletettu ydinvoiman tuotannon vähittäinen pieneneminen vuoden 2030 jälkeen, sillä ydinvoiman tuotanto kuluttaa muihin tuotantomuotoihin verrattuna laskennallisesti runsaasti primaarienergiaa. Tehostusskenaarioissa kokonaiskulutus on korkeimmillaan jo vuonna 2020 (noin 1 640 PJ), jonka jälkeen kulutus vähenee asteittain noin 1 570 PJ:n määrään. Kuvassa 8 on esitetty primaarienergian kulutuksen kehitys eri perusskenaarioissa vuoteen 2050 saakka, ja vastaavasti kuvassa 9 on esitetty kulutuksen kehitys tehostusskenaarioissa. Skenaariosarjojen ydinvoimavarianttien primaarienergian kokonaiskulutus on esitetty puolestaan kuvissa 10 ja 11.

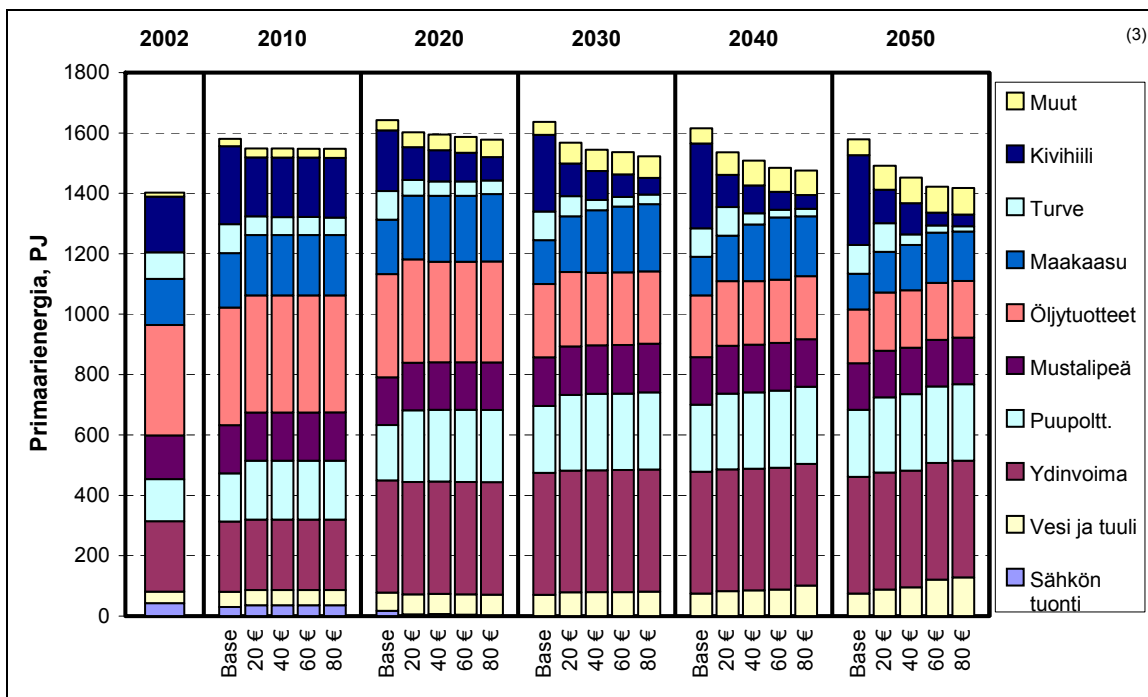
Kivihiilen kokonaiskäyttö kasvaa Baseline-skenaarioissa vuoden 2015 jälkeen koko tarkasteluajavälin ajan, mutta se vähenee päästökauppaskenaarioissa vuoden 2010 jälkeen sitä voimakkaammin, mitä korkeampi on päästöoikeuksien hinta. Erityisesti perusmetallien jalostuksessa käytettävän metallurgisen kivihiilen ja koksen käyttö kuitenkin estää kivihiilen käytöstä kokonaan luopumisen, sillä nykyinen tuotantotekniikka ei tarjoa sille juuri vaihtoehtoja. Myös **polttoturpeen** käyttö vähenee tuntuvasti tarkastelujakson alussa rajoitusskenaarioissa perusskenaarioon verrattuna. Turpeen kulutus kääntyy vuoden 2020 jälkeen kuitenkin uudelleen nousuun Baseline-skenaariossa ja alhaisimmalla päästöoikeuksien hinnalla. Tämä johtuu turpeen edullisesta tuotantokustannusten kehityksestä fossiilisiin tuontipolttoaineisiin verrattuna.

Öljyn kokonaiskäyttö kasvaa kaikissa skenaarioissa hieman vuoteen 2010 mennessä mutta laskee sen jälkeen hitaasti siten, että vuonna 2030 kulutus on jo selvästi nykytason alapuolella. Lasku jatkuu tarkastelujakson loppuun saakka. Vuoteen 2050 mennessä maailman öljyvarojen onkin arvioitu hupenevan siinä määrin, että raakaöljyn kokonais-tuotanto on jo kääntynyt laskuun. **Maakaasun** kokonaiskäyttö kasvaa eri skenaarioissa 180–200 PJ:n määrään vuonna 2010. Maakaasun kulutus kääntyy muita polttoaineita nopeamman hinnan nousun vuoksi laskuun vuoden 2020 jälkeen, mutta lasku jää hyvin lieväksi korkeimmilla päästöoikeuksien hinnoilla.

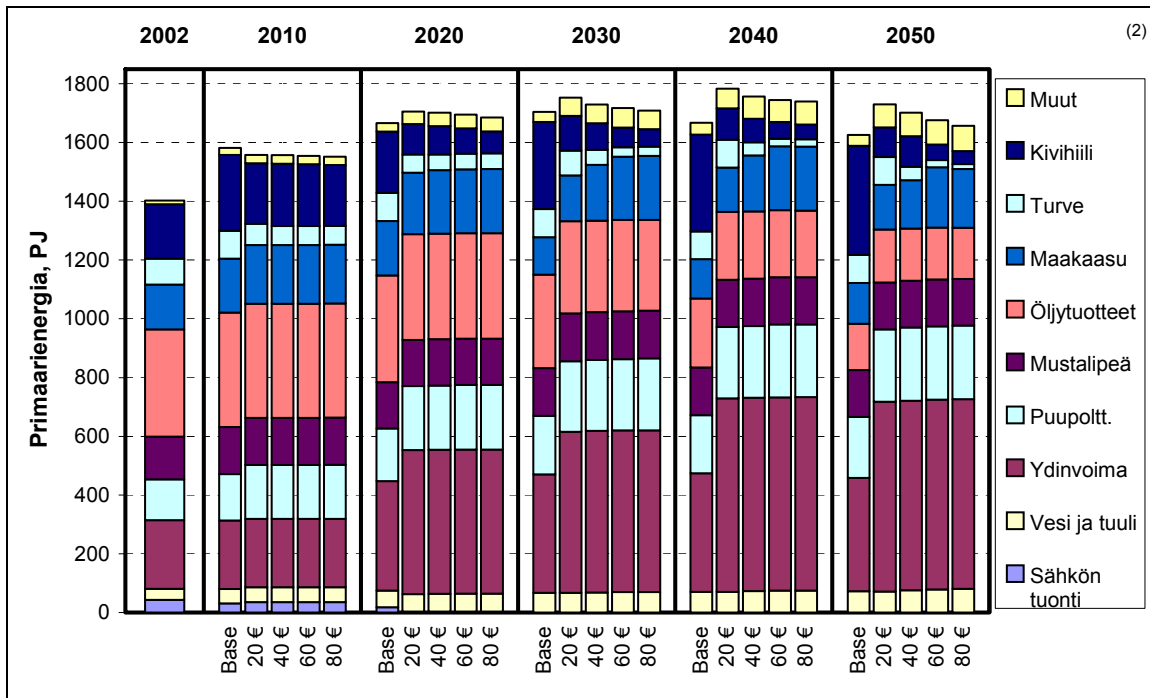
Bioenergian hyödyntäminen kasvaa vuoteen 2030 saakka varsin merkittävästi kokonaisenergiataseessa. Puupolttoaineita käytetään vuoteen 2030 mennessä 40–70 % enemmän kuin vuonna 2002, kun mustalipeää ei lasketa mukaan. Puun käytön lisäpotentiaalia on kuitenkin vuoden 2030 jälkeen vain hyvin rajoitetusti.



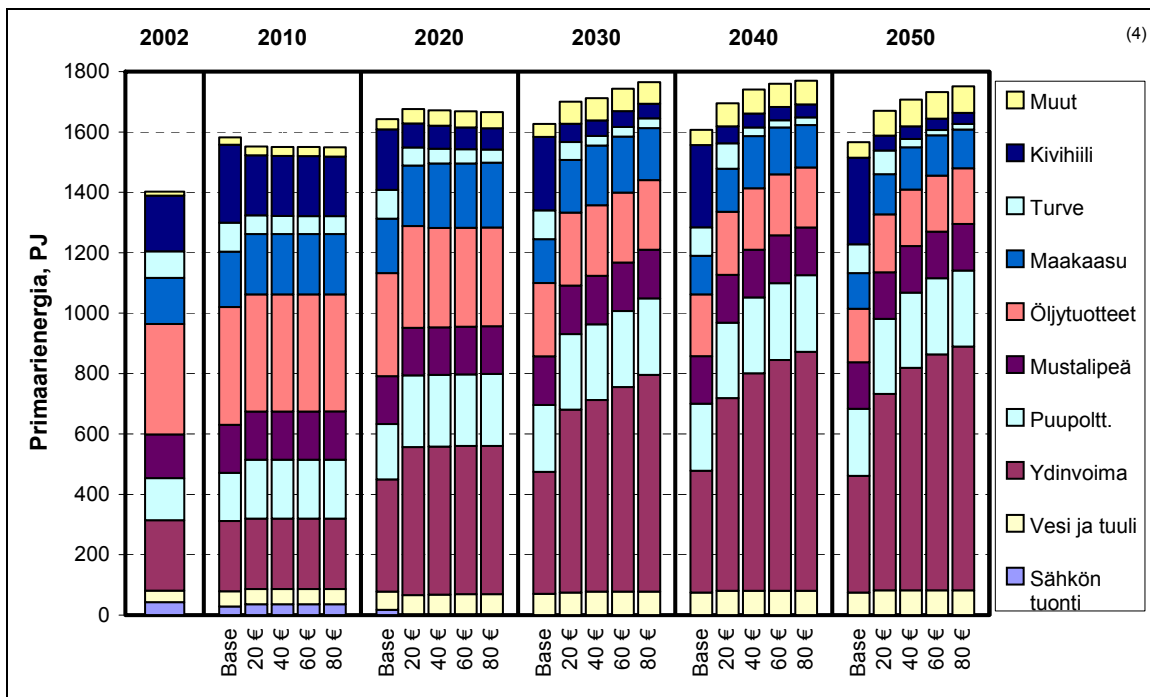
Kuva 8. Primaarienergian kokonaiskulutus energialähteittäin perusskenaarioissa A vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 9. Primaarienergian kokonaiskulutus energialähteittäin tehostusskenaarioissa A vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 10. Primaarienergian kokonaiskulutus energialähteittäin perusskenaarioissa B vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 11. Primaarienergian kokonaiskulutus energialähteittäin tehostusskenaarioissa C vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

4.2 Sähköenergian hankinta

Sähkön kokonaishankinnan kehittyminen ja sen rakenne on esitetty kuvissa 12–15 eri skenaariosarjoille. Kokonaistuotanto (tuonti mukaan lukien) kasvaa perusskenaarioiden Baseline-tapauksessa 102 TWh:n määrään vuonna 2020 ja 113 TWh:iin vuonna 2050. Tehostusskenaariossa Baseline-tuotanto nousee 101 TWh:n määrään vuonna 2020, mutta pysyy sen jälkeen huomattavasti perusskenaariota alhaisemmalla tasolla energiankäytön tehostustoimien oletetun perusskenaarioita paremman kannattavuuden ansiosta. Sähkön nettotuonti vähenee vuositasolla, mutta bruttokauppa on silti yhä huomattavaa.

Perusskenaarioissa ydinvoiman tuotanto säilyy vuonna 2030 valmistuvan kuudennen yksikön jälkeen vuoteen 2050 lähes vakiona. Tuotanto pienenee kuitenkin jonkin verran laitosten ikääntyessä oletetun käyttökertoimien heikentymisen takia. Muu varsinaisen lauhdevoiman tuotanto on vuoden 2015 jälkeen merkittävää ainoastaan Baseline-tapauksessa vuosina 2020–2030. Sähkön kulutushuippujen varalta tarvitaan kuitenkin tuonnin ja säätövesivoiman lisäksi pieni määrä tavanomaista lauhdevoimaa. Vuosina 2030–2050 perusurassa tuotetaan myös huomattava määrä väliottolauhdevoimaa (kuvissa ”Muu lauhde”), joka on päästökauppaskenaarioissa pääosin kannattamatonta.

Melkein kaikissa skenaarioissa vesivoiman koko lisäyspotentiali on kannattavaa ottaa käyttöön. Vuoden 2030 jälkeen heikommin kannattava minivesivoimapotentiaali otetaan kokonaan käyttöön vain korkeimmilla päästöoikeuksien hinnoilla. Tuulivoimatuotanto kasvaa vuoteen 2030 mennessä 3,6–5,4 TWh:n määrään ja vuoteen 2050 mennessä 5–16,5 TWh:n määrään. Tuotanto kasvaa nykytukien ansiosta myös Baseline-skenaarioissa tuntuvasti vuoteen 2030 saakka, mutta sen jälkeen kasvu jää pieneksi.

Kaukolämpövoiman tuotanto kasvaa kaikissa perusskenaarioissa huomattavasti vuoteen 2020 saakka, mutta sen jälkeen se kasvaa ainoastaan Baseline-tapauksessa. Päästökauppaskenaarioissa tuotanto pysyy sen jälkeen suunnilleen samana vuoteen 2030, ja tuotanto laskee vuoden 2030 jälkeen. Teollisuuden yhteistuotannon määrä kasvaa myös tuntuvasti vuoteen 2030 saakka, jonka jälkeen se kasvaa enää Baseline-tapauksessa ja alhaisimmilla päästöoikeuksien hinnoilla. Kaikkiaan sähkön ja lämmön yhteistuotannon määrä nousee vuoteen 2030 mennessä 40–45 TWh:n määrään mutta ei nouse enää vuoden 2030 jälkeen muissa kuin Baseline-skenaariossa. Vuonna 2050 yhteistuotannon määrä on perus-päästökauppaskenaarioissa 35–46 TWh siten, että päästöoikeuksien hinnan noustessa tuotanto jää pienemmäksi. Yhteistuotannon pieneminen päästöoikeuksien hinnan noustessa johtuu seuraavista tekijöistä:

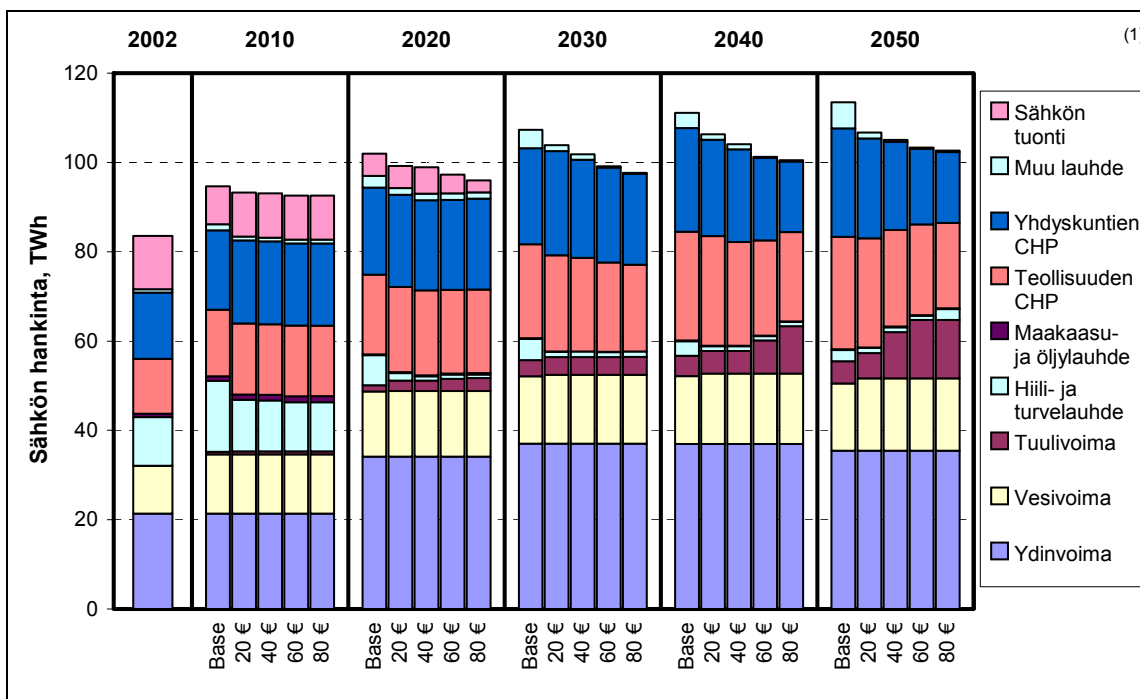
- Lauhdevoiman tuotanto on jo alhaisemminkin päästöoikeuksien hinnoilla niin vähäinen, että sähkön tuotannon päästöjä ei voida enää vähentää korvaamalla lauhdevoimaa yhteistuotannolla, vaan korvaamalla päästöjä vielä aiheuttavaa yhteistuotantoa muulla päästöttömämmällä sähkön tuotannolla.

- Biopolttoaineiden tuotantopotentiaali on rajallinen, minkä vuoksi niihin perustuvaa yhteistuotantoa ei voida enää juuri lisätä, vaan ainoa lisäkeino vähentää päästöjä aiheuttavaa yhteistuotantoa on vähentää lämmön kulutusta ja/tai korvata yhteistuotantoa päästöttömällä sähköntuotannolla.
- Kaukolämmön ja prosessihöyryn käyttöä voidaan tuntuvastikin tehostaa, jolloin yhteistuotannon potentiaali vähenee.
- Tuuli- tai ydinvoimaa lisäämällä voidaan lisätä päästötöntä sähköntuotantoa, jolla voidaan korvata päästöjä aiheuttavaa yhteistuotantoa.

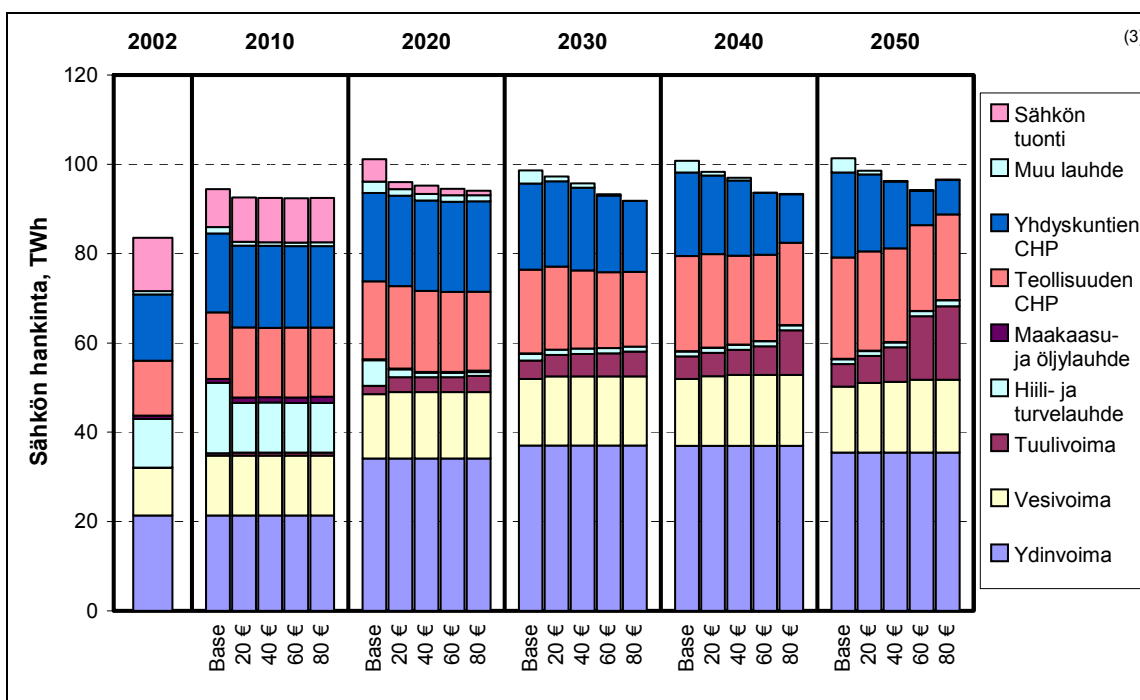
Uusi yhteistuotantokapasiteetti on päästöjä rajoitettaessa kaukolämpösektorilla vuoteen 2020 saakka maakaasualueella suurelta osin maakaasukombitekniikkaa sekä Itä- ja Pohjois-Suomessa leijukerrostekniikkaa. Näiden lisäksi pienen kokoluokan laitoksissa voi tulla käyttöön kaasutusmoottoritekniikkaa, jossa kiinteän polttoaineen kaasutin on integroitu moottorivoimalaitokseen. Vuodesta 2025 lähtien käyttöön tulee lisäksi varsinaisia IGCC-laitoksia. Myös teollisuudessa otetaan uusia maakaasukombilaitoksia vuoteen 2020 mennessä käyttöön. Massa- ja paperiteollisuudessa otetaan korkeimpien päästöi-keuksien hintojen skenaarioissa lisäksi jo vuoden 2015 jälkeen käyttöön puubiomassan kaasutukseen perustuvia IGCC-laitoksia sekä vuoden 2025 jälkeen jäteliemen kaasutus-laitoksia.

Skenaarioissa oletettiin merkittävinä uusina tekniikoina markkinoille tulevan myös CO₂-erotuksella varustetut kaasutus-, maakaasukombi- ja polttokennovoimalaitokset sekä lauhdevoiman että kaukolämpövoiman tuotantoon. Tulosten mukaan CCS-tekniikka tulee päästökauppaskenaarioissa yli 40–80 €/t hintatasoilla käyttöön vuodesta 2030 sähkö- ja lämmön yhteistuotannossa maakaasukombitekniikalla ja joissakin tapauksissa myös turvelauhdevoiman tuotannossa IGCC-tekniikalla.

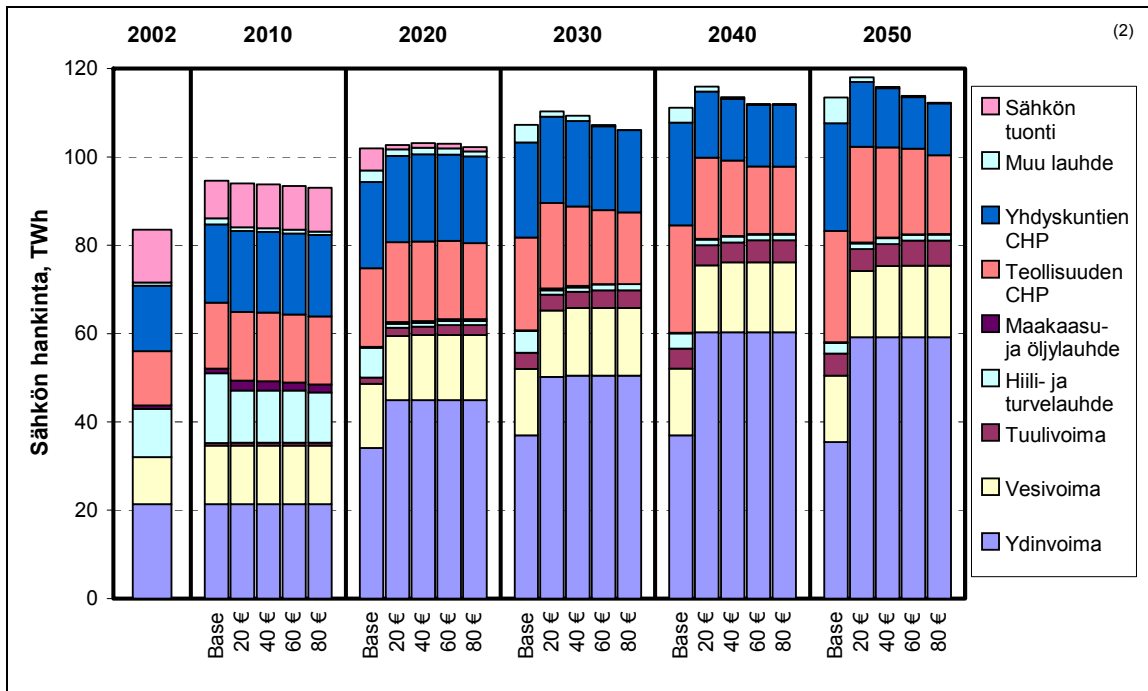
Perus- ja tehostusskenaarioiden B- ja C- eli *ydinvoimavarianttien* tulosten mukainen sähkön hankintarakenteen kehitys on esitetty kuvissa 14 ja 15. Tulosten mukaan ydinvoimakapasiteettia kannattaa lisätä lähes koko skenaarioissa sallitun enimmäismäärän, eli 6 400–9 000 MW:n määrään vuonna 2030 ja noin 10 000 MW:iin vuonna 2050 (tästä merkittävä osa korvausinvestointeja). Tehostusskenaarioissa kuulakekoreaktorit tulevat kannattavimmaksi laitostyyppiksi vuoden 2025 jälkeen. Kummassakin skenaariosarjassa yhteistuotannon osuus jää alle 25 %:n koko sähkön tuotannosta vuonna 2050. Kuten edellä on huomautettu, tämä johtuu suurelta osin sähkön nettoviennin estämisestä, jolloin systeemihinta laskee ydinvoimaa runsaasti lisääessä Suomessa pohjoismaista markkinahintaa alemmalle tasolle, ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen sähköllä muodostuu joissakin kohteissa edulliseksi päästöjen vähennystoimeksi.



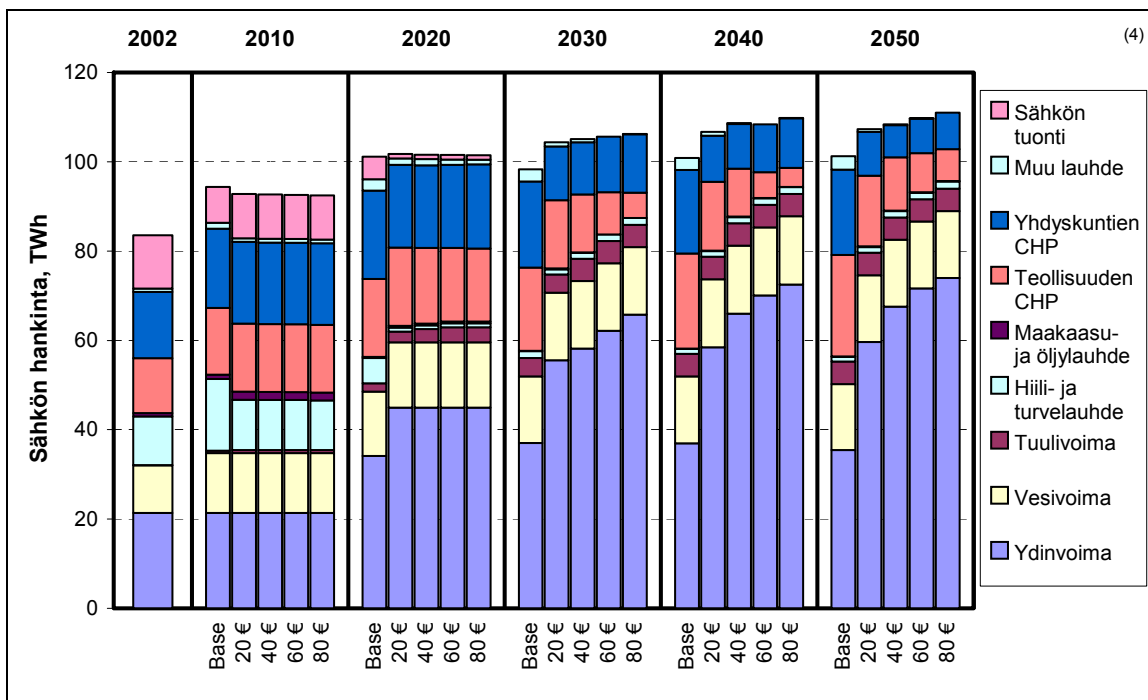
Kuva 12. Sähkönenergian kokonaishankinnan rakenne perusskenaarioissa A vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 13. Sähkönenergian kokonaishankinnan rakenne tehostusskenaarioissa A vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 14. Sähköenergian kokonaishankinnan rakenne perusskenaarioissa B vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 15. Sähköenergian kokonaishankinnan rakenne tehostusskenaarioissa C vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

4.3 Sähkön kokonaiskulutus

Suomen sähkön kokonaiskulutus oli vuonna 2006 noin 90 TWh, siirtohäviöt mukaan lukien. Kuten sähkön hankintaa koskevassa kappaleessa edellä mainittiin, sähkön kokonaiskulutus kasvaa perusskenaarioiden Baseline-tapauksessa 102 TWh:n määrään vuonna 2020 ja 113 TWh:n määrään vuonna 2050. Tehostusskenaarioiden Baseline-tapauksessa kulutus nousee 101 TWh:n määrään vuonna 2020, mutta pysyy sen jälkeen huomattavasti perusskenaarioita alhaisemmalla tasolla energiankäytön tehostustoimien oletetun paremman kannattavuuden ansiosta.

Perusskenaarioiden päästökauppatapauksissa sähkön kulutus laskee hinnan noustessa asteittain noin 10 %, siten että korkeimman hinnan tapauksessa kulutus on enää vajaat 103 TWh vuonna 2050. Myös tehostusskenaarioissa kulutus laskee tehostus-Baseline-skenaarion tasolta, mutta vain noin 5 %:n verran 96 TWh:n määrään vuonna 2050.

Tehostusskenaarioiden B- ja C-varianteissa, joissa on tulosten mukaan edullista rakentaa hyvin runsaasti lisää ydinvoimakapasiteettia, sähkön kulutus nousee jonkin verran päästöoikeuksien hinnan kohotessa. Tämä johtuu muun muassa seuraavista syistä:

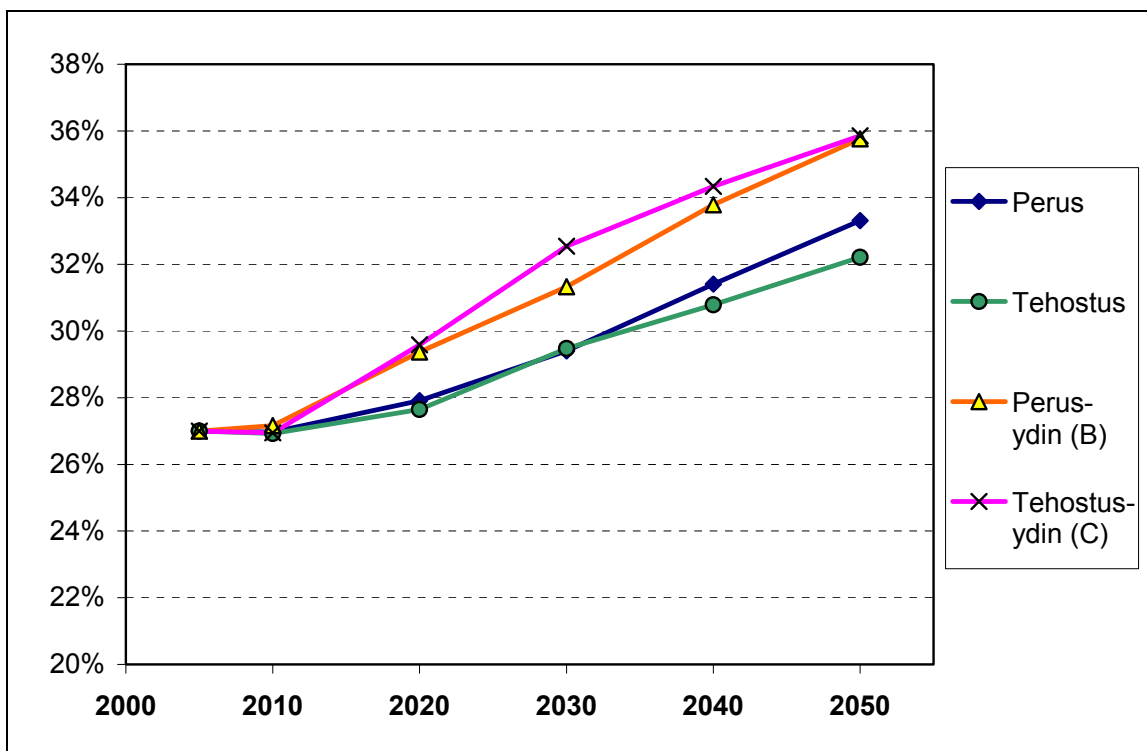
- Skenaarioissa ei sallittu sähkön nettovientiä, jolloin sähkön systeemihinta Suomessa laskee ydinvoimaa runsaasti lisättäessä.
- Sähkön hinnan alentuessa sähköistyminen muodostuu joissakin kulutuskohteissa päästöjen vähentämisen kannalta edulliseksi päästöjen vähentämisen kannalta.
- Alhaisemmat sähkön hinnat myös vähentävät sähkön käytön tehostustoimien kustannustehokkuutta päästöjen vähentämiseksi.

Tehostamistoimenpiteitä voitaisiin kuitenkin edistää myös erilaisin kannustus- ja tukitoimenpitein. Taulukossa 8 on esitetty yhteenveto sähkön kulutuksen tehostumisesta. **On syytä huomata, että kasvava sähkön kulutus ei sinänsä tarkoita kasvavaa primäärienergian kulutusta, vaan lisääntyvä energiajärjestelmän sähköistyminen korvaa päästöjen kannalta haitallisempaa muuta energian loppukulutusta.**

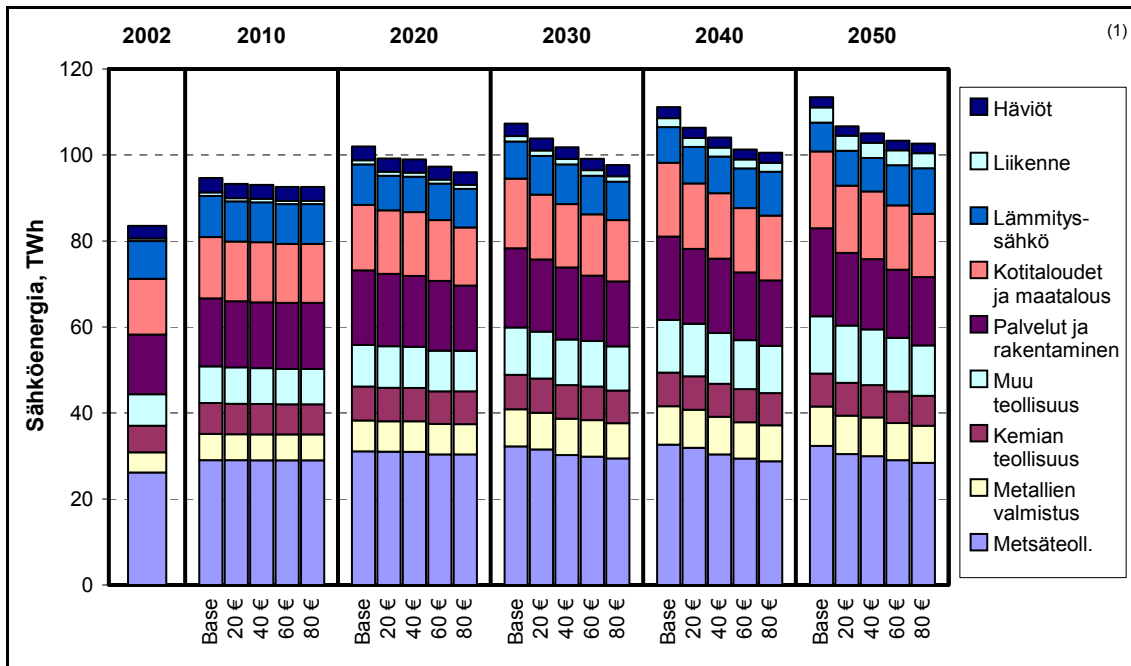
Taulukko 8. Sähkön kulutuksen tehostuminen eri skenaarioissa perus-Baseline-skenaarioon verrattuna.

	Hinta	Perus-A		Perus-B		Tehostus-A		Tehostus-C	
		2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Teollisuus	40 €	4.6 %	5.0 %	1.0 %	0.5 %	12.3 %	12.1 %	6.0 %	5.4 %
	60 €	5.2 %	8.1 %	3.6 %	2.9 %	14.0 %	14.3 %	6.2 %	5.5 %
	80 €	7.4 %	10.9 %	4.9 %	4.6 %	15.0 %	14.3 %	6.5 %	5.5 %
Palvelut	40 €	8.9 %	19.9 %	3.8 %	2.7 %	20.8 %	39.7 %	11.5 %	27.1 %
	60 €	17.5 %	22.4 %	3.8 %	4.5 %	24.8 %	40.6 %	11.5 %	27.1 %
	80 €	17.8 %	22.4 %	6.9 %	15.8 %	30.7 %	40.6 %	11.5 %	26.4 %
Kotitaloudet	40 €	9.3 %	11.9 %	0.0 %	3.2 %	19.3 %	23.9 %	13.9 %	18.6 %
	60 €	12.0 %	16.0 %	4.9 %	10.9 %	19.3 %	27.4 %	12.8 %	19.3 %
	80 €	11.8 %	17.2 %	4.9 %	10.1 %	18.9 %	26.5 %	12.8 %	18.8 %

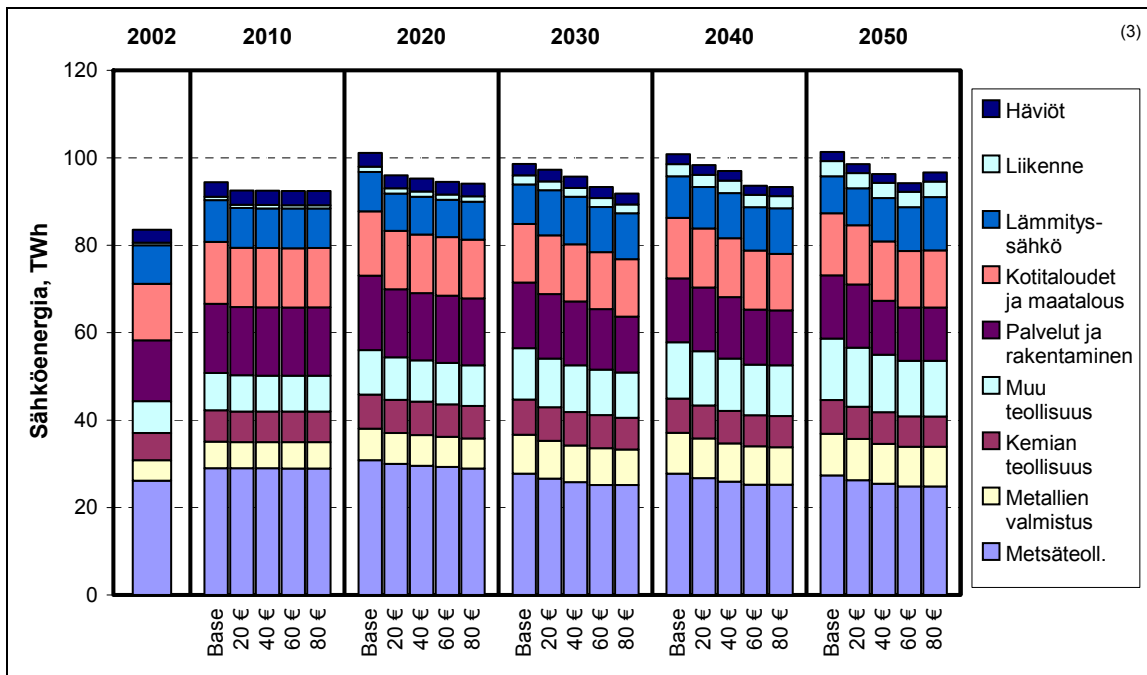
Energiajärjestelmän sähköistymistä eri skenaariosarjoissa on havainnollistettu kuvassa 16, jossa on esitetty sähkön loppukulutuksen osuus energian koko loppukulutuksesta 60 €:n päästökauppaskenaarioissa. Kuten kuva osoittaa, sähköistyminen on selvästi voimakkaampaa ydinvoimaa runsaasti lisäävissä skenaarioissa. Tulokset sektoreittain on esitetty kuvissa 17 ja 18.



Kuva 16. Sähkön loppukulutuksen osuus energian koko loppukulutuksesta vuosina 2002–2050, kun päästöoikeuksien hinnan oletetaan nousevan 60 € tasolle vuoteen 2045 mennessä.



Kuva 17. Sähkön kokonaiskulutus sektoreittain perusskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 18. Sähkön kokonaiskulutus sektoreittain tehostusskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

4.4 Uusiutuva energia

Uusiutuvan energian hyödyntäminen kasvaa kaikissa päästökauppaskenaarioissa tuntuvasti. Edellä on jo esitetty tuloksia tuuli- ja vesivoiman osuudesta sähköntuotannossa. Bioenergian ja jätepolttoaineiden hyödyntämisen kehitystä on havainnollistettu kuvissa 19 ja 20 perus- ja tehostusskenaarioiden osalta. Kuvista on jätetty pois mustalipeän käyttö, jonka määrä on varsin suoraan verrannollinen kemiallisen massan tuotantoon. Muiden kiinteiden puupolttoaineiden hyödyntämisen lisäysmahdollisuudet tyrehtyvät skenaarioissa käytettyjen oletusten mukaan noin 230 PJ:n tasolla. Päästökauppaskenaarioissa lähes koko tuotantopotentiaali otetaan käyttöön jo vuoteen 2030 mennessä. Kokonaispotentiaalin rajallisuuden takia uudet puupolttoainejalosteet, kuten puupelletit tai bioöljy, eivät saa päästöjen rajoittamisesta merkittävää kilpailuetua.

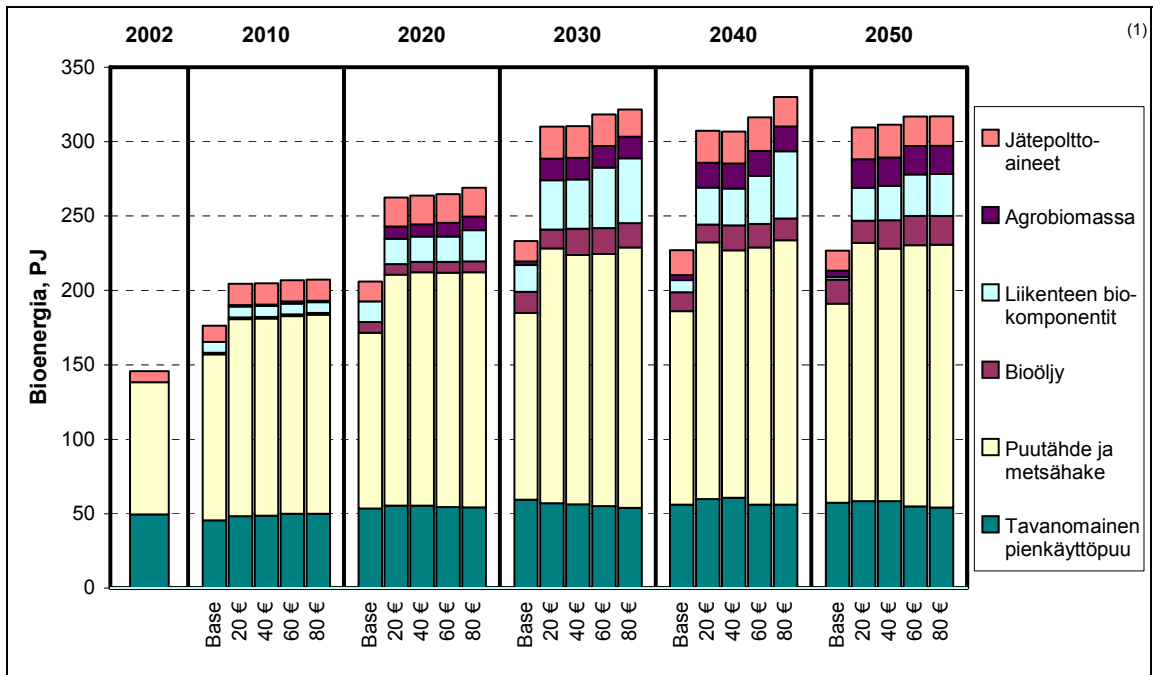
Kierrätys- ja jätepolttoaineiden hyödyntämisen enimmäismäärä saavutetaan tulosten mukaan jo noin vuonna 2020, jonka jälkeen jätteen energiakäyttö pysyy suunnilleen samalla tasolla vuoteen 2050 saakka. Vuoteen 2020 saakka bioenergian ja kierrätyspolttoaineiden käytössä on ylivoimaisesti merkittävin kotimaisen energian hyödyntämisen lisäyspotentiaali. Vuoden 2020 jälkeen myös tuulivoima ja maalämpö saavat jo näkyvämmän sijan kotimaisina energialähteinä.

Tuulivoimakapasiteetin kokonaismäärän ylärajana oli perusuraskenaarioissa 2 000 MW vuonna 2020 ja 4 300 MW vuonna 2050. Vuoden 2020 potentiaalista kuitenkin vain enimmillään noin 1 200 MW (2,9 TWh) tulee perusskenaarioissa käyttöön. Vuonna 2050 koko oletettu tuulivoimapotentiaali hyödynnetään korkeimmilla päästöoikeuksien hinnoilla. Myös vesivoiman lisätuotannon koko oletettu potentiaali vuonna 2020 otetaan kaikissa päästökauppaskenaarioissa käyttöön. Vesivoiman kokonaistuotanto nousee tällöin 14,7 TWh:n määrään.

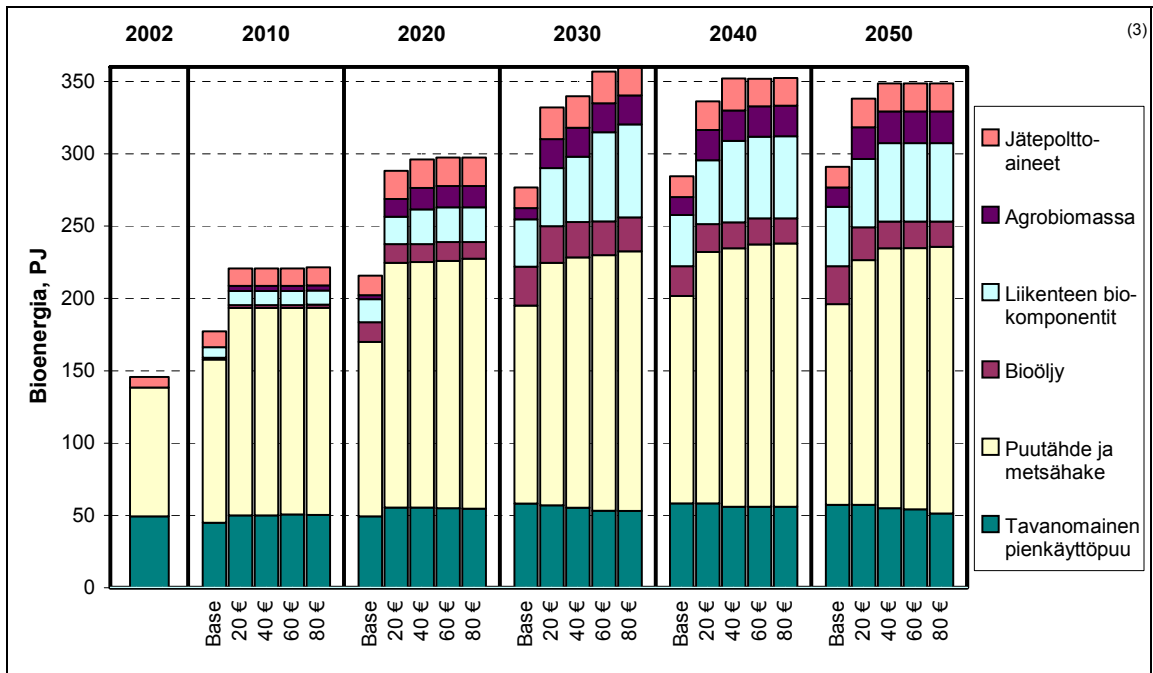
Kaikkiaan uusiutuvien energialähteiden vuodelle 2020 oletetut potentiaalit tulevat siis päästökauppaskenaarioissa melko kattavasti hyödynnetyiksi. Taulukossa 9 on esitetty tuloksista lasketut uusiutuvan energian osuudet energian loppukulutuksesta. EU:n RES-direktiivin mukaan Suomen tavoite uusiutuvien osuudelle olisi 38 % vuonna 2020, joka on varsin haastava tavoite ja joka saavutetaan perusskenaarioissa vain korkeimmilla päästöoikeuksien hintatasoilla.

Taulukko 9. EU:n RES-direktiivin mukaiset uusiutuvan energian osuudet eri skenaarioissa vuonna 2020.

	20 €	40 €	60 €	80 €
Perus-A	36.5 %	36.9 %	37.5 %	38.3 %
Perus-B	36.3 %	36.7 %	37.2 %	37.7 %
Tehostus-A	39.7 %	40.4 %	40.8 %	41.3 %
Tehostus-C	39.2 %	40.0 %	40.4 %	40.6 %



Kuva 19. Bioenergian, kierrätys- ja jätepolttoaineiden kokonaiskäyttö (ilman puunjalostuksen jäteliemiä) perusskenaarioissa A vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 20. Bioenergian, kierrätys- ja jätepolttoaineiden kokonaiskäyttö (ilman puunjalostuksen jäteliemiä) tehostusskenaarioissa A vuosina 2002–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

4.5 Asuin- ja palvelurakennusten lämmitys

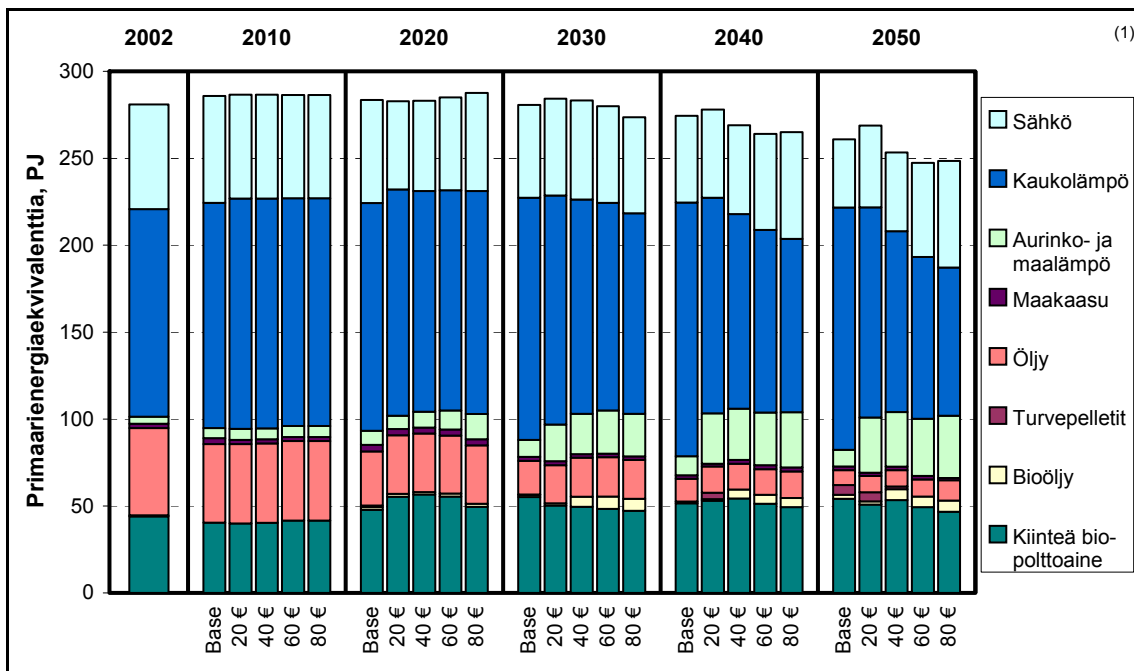
Suomessa otettiin vuoden 2001 ilmastostrategian mukaisesti vuonna 2003 käyttöön entistä tiukempia rakennusmääräyksiä. Lisäksi korjausrakentamiseen on mahdollista saada tukea. Näiden tekijöiden ansiosta sekä uusien että vanhojen rakennusten ominaiskulutukset pienenevät. Vaikka sekä asuin- että palvelurakennuskannan oletetaan kasvavan merkittävästi, rakennusten lämmitysenergian kokonaiskulutus pysyy skenaariotulosten mukaan vuoteen 2030 saakka suunnilleen aiemmalla tasolla ja kääntyy sen jälkeen hienoiseen laskuun. Rakennusten lämmitysenergian käytön kehitystä tarkastelluissa skenaarioissa on havainnollistettu kuvissa 21 ja 22.

Oheislämpöjen hyödyntämisen ansiosta ominaiskulutusten pieneminen vähentää lämmityslaitteilla tuotettavan lämmön määrää suhteellisesti vielä enemmän. Kiinteiden kustannusten suuren osuuden vuoksi lämmityksen yksikkökustannukset kuitenkin tällöin 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. Pääomavaltaiten lämmitystekniikoiden markkina-asema siten heikkenee ja sähkölämmitystekniikoiden asema paranee ominaiskulutusten pienentyessä. Tämä näkyy sekä perusskenaarioiden tuloksissa että erityisesti ydinvoimaa runsaasti lisäävissä skenaariovarienteissa. On kuitenkin huomattava, että tuloksissa sähkön kulutus sisältää myös lämpöpumppujen sähkön ja aurinkolämmityksen tukena käytettävän lämmityssähkön.

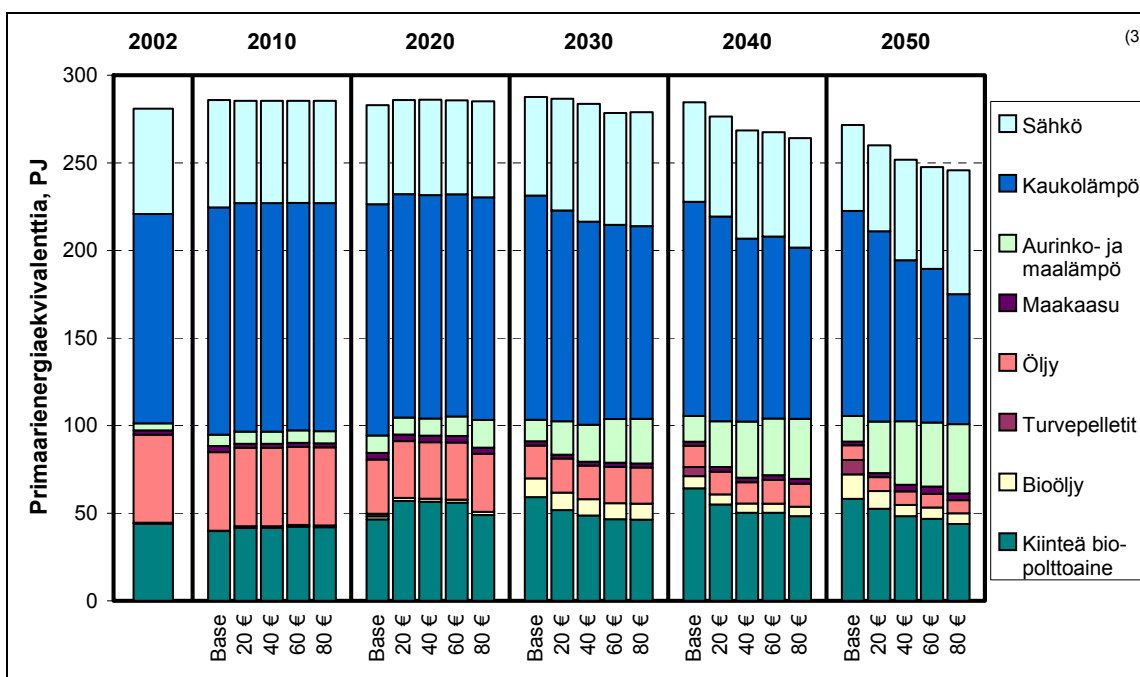
Tavanomainen öljylämmitys on tulosten mukaan lämmitysmuotojen markkinaosuuksissa selvin häviöjä. Bioöljykattiloiden tulevalla kehitystyöllä on tulosten mukaan myös merkitystä mineraaliöljyn käytön ja siitä aiheutuvien päästöjen vähentämisessä. Skenaarioissa käytettyjen verraten varovaisten oletusten mukaan bioöljy tulisi kilpailukykyiseksi lämmitysenergian lähteeksi suunnilleen vuoden 2020 jälkeen.

Lämpöpumpputeknologioiden markkinat kasvavat kaikissa päästökauppaskenaarioissa nopeasti. Ominaiskulutuksen pienemisestä johtuva pääomakustannusten merkityksen korostuminen heikentää kuitenkin kalliiden porakaivon perustuvien lämpöpumppujärjestelmien kilpailukykyä, jolloin ilmalämpöpumppujen merkitys korostuu.

Skenaarioissa käytettyjen melko varovaisten hintakehitystä koskevien perusarvioiden mukaan puupelletit eivät kuitenkaan tule niin kilpailukykyisiksi, että ne saavuttaisivat Suomessa merkittävää markkinaosuutta. Automaattisyöttöisten kattiloiden ja takkojen kehityksellä voidaan kuitenkin joka tapauksessa arvioida olevan varsin suuri merkitys puupolttoaineiden markkinaosuuden kasvupotentiaalille.



Kuva 21. Asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen energialähteiden kulutus peruskasuaarioissa A vuoteen 2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 22. Asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen energialähteiden kulutus tehostuskasuaarioissa A vuoteen 2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

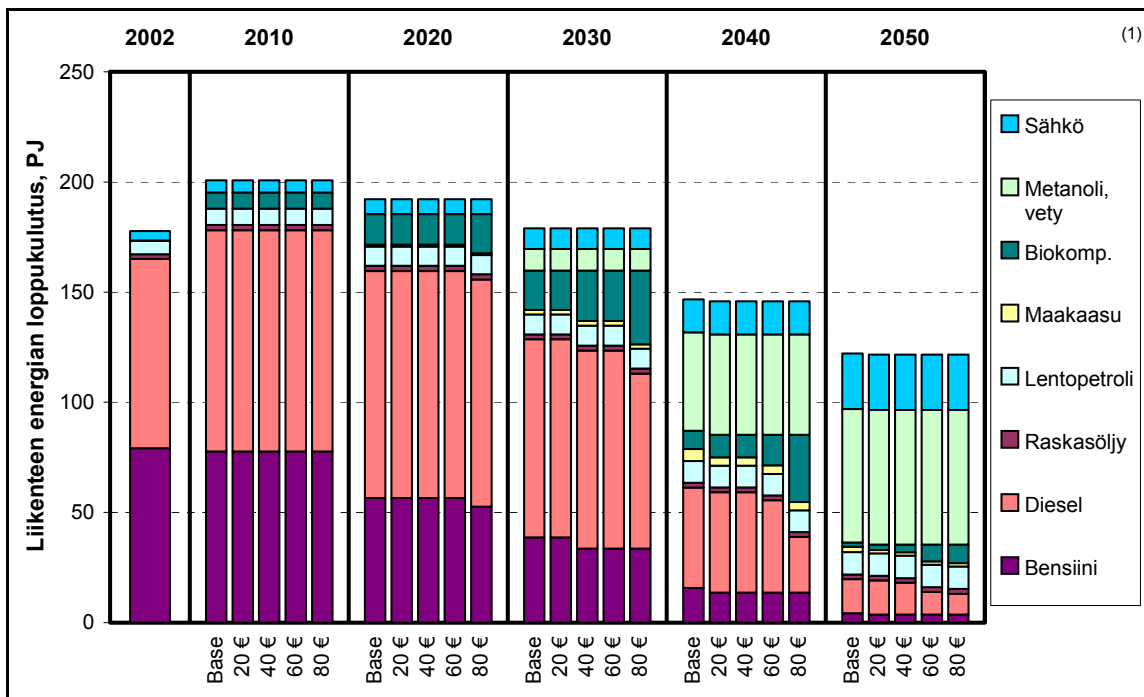
4.6 Liikenteen energian käyttö

Tavanomaisten liikennepolttoaineiden kulutuksen aiheuttamia kasvihuonekaasujen nettopäästöjä voidaan pienentää lisäämällä polttoaineisiin metanoli- tai etanolipohjaisia biokomponentteja. Skenaarioissa oletettiin vähimmäistavoitteena, että sekä bensiini- että dieselpolttoaineiden sisältämä biopohjainen osuus nousee vuoteen 2010 mennessä noin 4 %:iin ja vuoteen 2020 mennessä 8 %:iin. Nämä osuudet vastaavat suunnilleen biokomponentteja koskevan EU-direktiivin mukaisia tavoitteita.

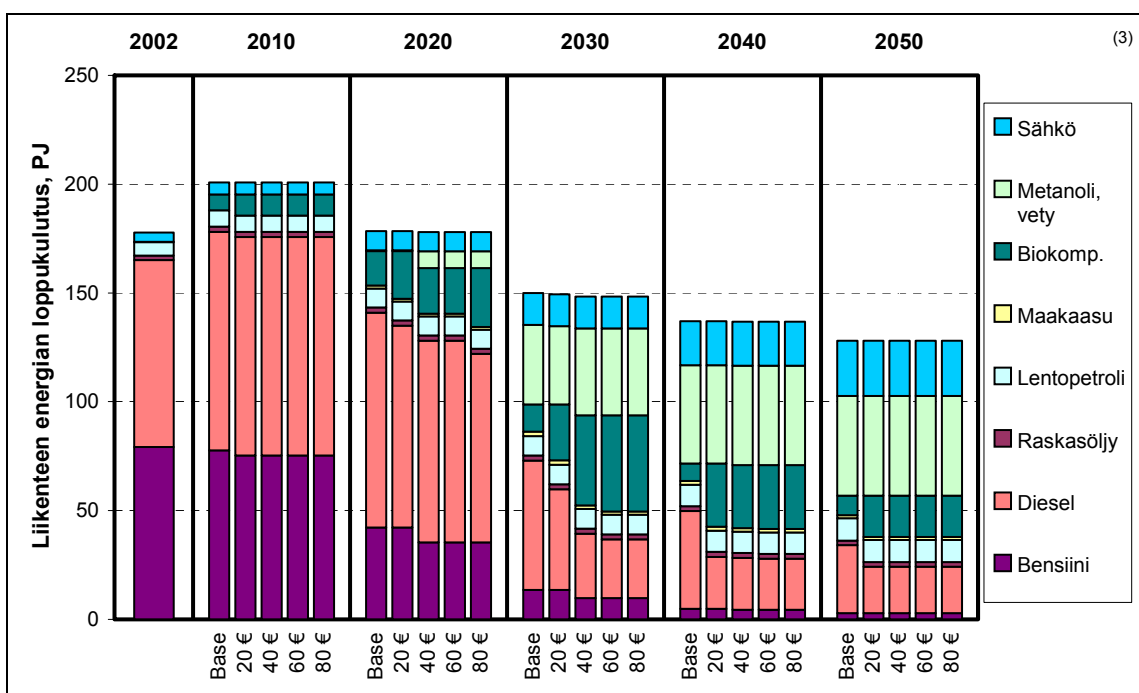
Vähimmäistavoitteen lisäksi oletettiin biokomponenttien käyttöä voitavan lisätä kaikessa bensiinissä 12 %:iin ja dieselissä 15 %:iin vuoteen 2020 mennessä, mikäli se on päästöjen vähentämisen kannalta edullista. Tämän lisäksi oletettiin vielä uusissa dieselajoneuvoissa voitavan käyttää vuoteen 2020 mennessä 50 % biokomponentteja sisältävää polttonestettä, ja vuoteen 2030 mennessä jopa 90 %:sesti biopohjaista dieseliä. Tulosten mukaan biokomponenttien käytön lisääminen vähimmäistavoitetta nopeammin tulee kannattavammaksi päästöoikeuksien hinnan noustessa. Kannattavuus nousisi kuitenkin vielä paremmaksi, jos biopolttoaineen voitaisiin olettaa olevan kokonaisuudessaan tuontienergiaa. Skenaarioissa oletettiin kuitenkin, että 50 % biokomponenteista on tuotettava Suomessa metsäpolttoaineesta. Biokomponenttien käyttö vähentää siten skenaarioissa metsäpolttoaineen käyttöpotentiaalia muilla sektoreilla ja nostaa metsäpolttoaineen hintaa.

Pitkällä aikavälillä liikenteen energiankäytössä oletettiin voivan tapahtua tavanomaisen tekniikan paranemisen lisäksi suuria teknologisia muutoksia. Lähes koko autokannassa valtateknologia voi arvioiden mukaan vaihtua bensiinikäyttöisestä ottomoottorista polttokennopohjaiseen ajoneuvotekniikkaan, ja näin oletettiin myös tarkastelluissa skenaarioissa. Sähköautojen kaupallisen kilpailukykyyn oletettiin keskittyvän taajamien lyhyiden etäisyyksien liikenteeseen. Polttokennoajoneuvojen energialähteenä skenaarioissa oletettiin voitavan käyttää joko metanolia tai puhdasta vetyä. Uusiutuvista energialähteistä valmistetun metanolin tai vedyn korkeiden kustannusten vuoksi molemmat oletettiin valmistettavan maakaasusta. Valmistuksessa syntyvät CO₂-päästöt on otettu huomioon energiasektorin hiilidioksidipäästöissä. Tarkastelussa otettiin lisäksi huomioon mahdollisuus liittää vedyn valmistukseen hiilidioksidin erotus ja talteenotto, jolloin päästöt jäävät hyvin pieniksi. Vetykäyttöisillä polttokennoajoneuvoilla voitaisiin siten vähentää liikenteen kasvihuonekaasujen päästöjä hyvin merkittävästi.

Päästöjen rajoittaminen vaikuttaa ajoneuvotekniikoiden keskinäiseen kilpailukykyyn vain vähän. Tästä syystä myös erot perusuran ja rajoitusskenaarioiden välillä ovat hyvin pienet, kuten tulokset (kuvat 23 ja 24) havainnollistavat. Liikenteessä on siis merkittävää päästöjen vähennyspotentiaalia, mutta päästötavoitteen tiukkuudella ei ole tuntuvaa vaikutusta uusien ajoneuvotekniikoiden keskinäiseen kilpailukykyyn.



Kuva 23. Liikenteen energian loppukulutus perusskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 24. Liikenteen energian loppukulutus tehostusskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

4.7 Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt

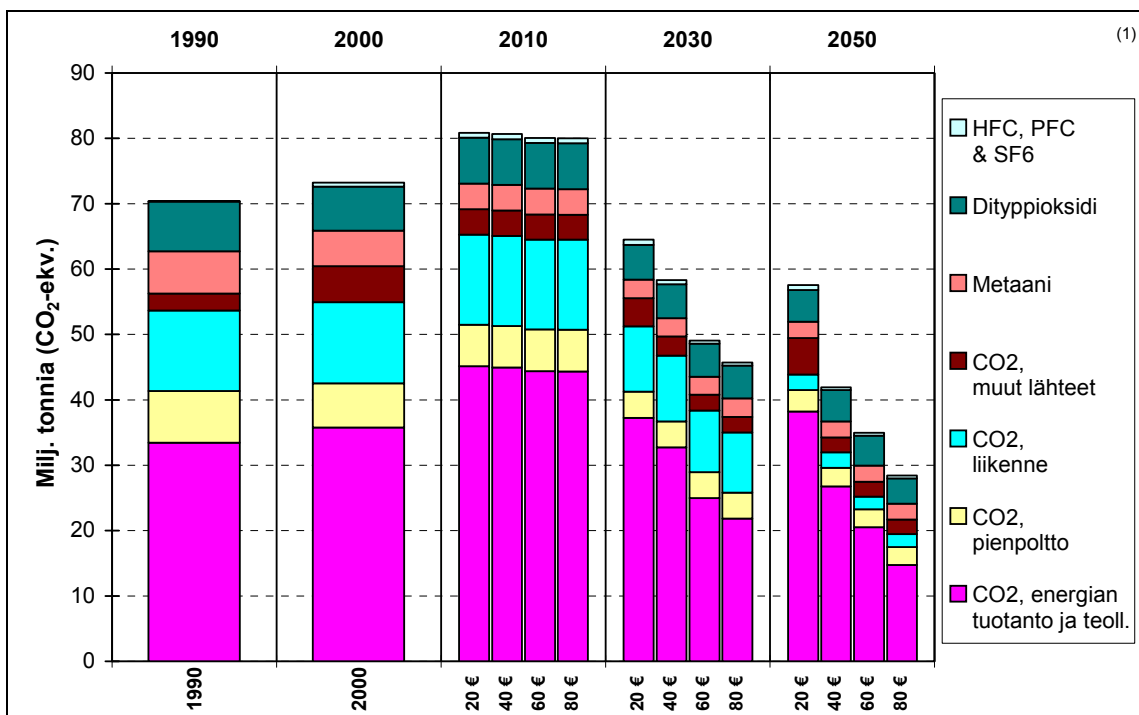
Mallilaskelmien yhtenä keskeisenä tuloksena saadaan Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen kokonaistase tarkasteluvuosittain. Päästöjen laskennan lähtökohtana käytettiin vuonna 2005 tarkistettua päästöinventaaria, jonka mukaan päästöjen kokonaismäärä oli vuonna 1990 noin 70,4 miljoonaa tonnia CO₂-ekvivalenteina. Päästöoikeuksien hinnan vaikutusta kasvihuonekaasujen kokonaispäästöihin pääluokittain on havainnollistettu kuvissa 25 ja 26 perus- ja tehostusskenaarioissa.

Kuten tarkasteltavien skenaarioiden esittelyssä mainittiin, päästöoikeuksien hinnaksi oletettiin Kioto-periodilla kaikissa tapauksissa vain 20 €/tonni, joten skenaarioiden välillä ei ole vuonna 2010 juuri eroa. Jos kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseksi ei tehtäisi Suomessa nykyisen politiikan lisäksi erityisiä lisätoimia ja EU:n päästökauppa loppuisi (Baseline-skenaario), päästöjen kokonaismäärä kasvaisi mallilaskelmien mukaan vuoden 1990 70,4 miljoonasta tonnista vuoteen 2010 mennessä noin 89 miljoonaa tonniin. Olkiluodon uuden 1 600 MW:n ydinvoimalaitoksen valmistumisen viivästyksen takia Kioton periodilla tarvitaan siis tulosten mukaan päästöjen vähennyksiä noin 18 miljoonaa tonnia vuodessa Baseline-skenaarioon verrattuna. Päästöjen määrä olisi vuonna 2020 kuitenkin jo selvästi tätä pienempi, noin 80 milj. tonnia, ja sen jälkeen päästöt pysyisivät suunnilleen samalla tasolla.

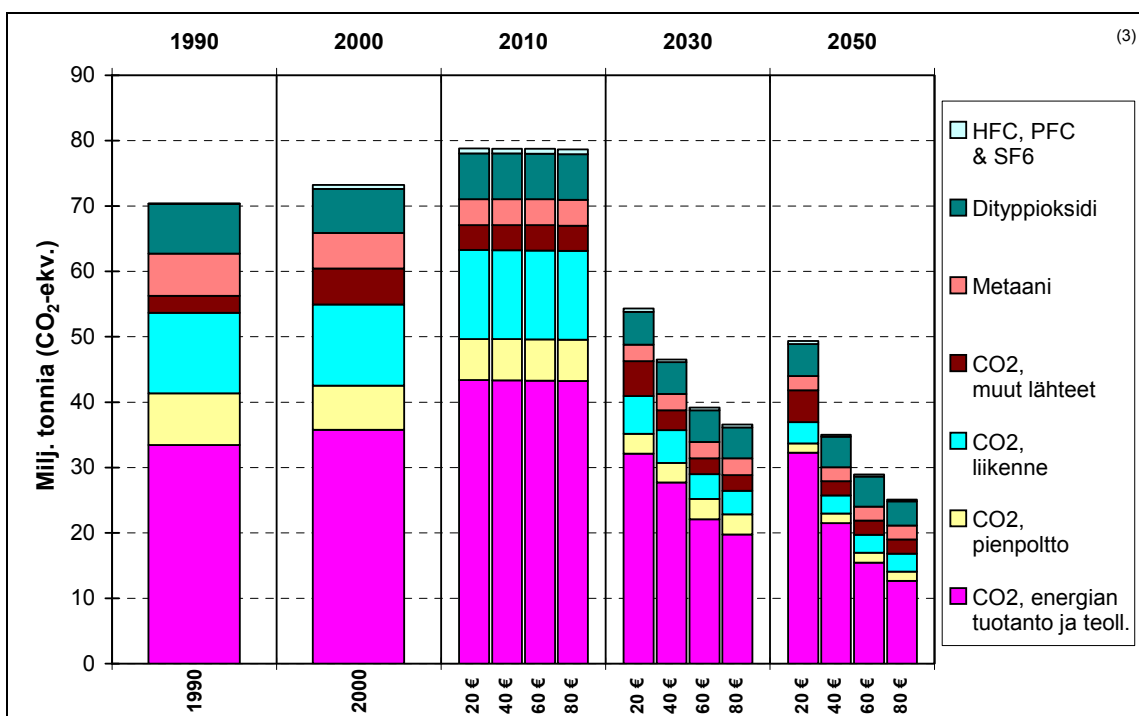
Vuoden 2015 jälkeenkin suurin paine päästöjen lisäykseen on energian tuotannossa ja teollisuudessa. Päästökauppaskenaarioissa päästöt alkavat kuitenkin vähentyä myös näillä sektoreilla. Tuntuvia päästöjen vähennyksiä saavutetaan vuoden 2015 jälkeen myös liikenteessä. Taulukossa 10 on esitetty saavutetut kokonaispäästöjen vähennykset vuonna 2020, 2030 ja 2050 eri päästökauppaskenaarioissa. Tulosten mukaan päästöjen vähennys on vuoteen 2050 mennessä enimmillään 66 %, joka saavutetaan korkeimman hinnan tehostusskenaariossa C. Erot eri skenaariosarjoissa saavutetuissa suurimmissa päästöjen vähennyksissä ovat kuitenkin melko pienet.

Taulukko 10. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset eri skenaarioissa vuoteen 1990 verrattuna. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

Sarja	Hinta	A-skenaariot			B- ja C-skenaariot		
		2020	2030	2050	2020	2030	2050
Perus	20 €	2 %	9 %	19 %	5 %	19 %	31 %
	40 €	5 %	18 %	41 %	7 %	29 %	52 %
	60 €	7 %	31 %	51 %	10 %	38 %	58 %
	80 €	8 %	35 %	60 %	11 %	42 %	63 %
Tehostus	20 €	8 %	23 %	31 %	12 %	32 %	42 %
	40 €	11 %	34 %	51 %	15 %	43 %	60 %
	60 €	13 %	45 %	59 %	16 %	51 %	64 %
	80 €	15 %	48 %	64 %	17 %	54 %	66 %



Kuva 25. Kasvihuonekaasujen päästöt pääluokittain perusskenaarioissa A vuosina 1990–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 26. Kasvihuonekaasujen päästöt pääluokittain tehostusskenaarioissa A vuosina 1990–2050. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

4.8 Päästöjen vähentämistoimet eri sektoreilla

Lyhyellä tähtämellä kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää kustannustehokkaasti voimakkaimmin vuoden 1990 tasosta metaanipäästöjen ja pienpolton hiilidioksidipäästöjen osalta. Metaanipäästöjen vähennyksestä merkittävin osa saadaan aikaan jätehuollon päästöissä, jotka voidaan kohtuullisen edullisesti puolittaa vuoden 1990 tasosta. Vuoteen 2015 mennessä uuden ydinvoimalaitoksen käyttöönotto on kuitenkin päästöjen vähentämisen kannalta hyvin keskeinen yksittäinen toimi. Laitoksen tuottaman sähkön ansiosta muun lauhdevoiman tuotanto voidaan kohtuullisin kustannuksin supistaa hyvin vähäiseksi. Toinen merkittävä energian tuotannon päästöjä vähentävä toimi vuoteen 2020 mennessä on suojelemattoman vesivoiman arvioidun lisäyspotentiaalin hyödyntäminen täysimääräisesti.

Kioton periodin jälkeen vuoteen 2030 mennessä käynnistyväksi oletettu toinen suuri ydinvoimalaitos tuottaa jälleen merkittävän päästöjen vähennyksen, mutta sen jälkeen ei perusskenaarioissa ole suuria energian tuotannossa yksittäisiä päästöjen lisävähennyskeinoja. Tuulivoiman tuotannon asteittainen lisääminen on kuitenkin tämän jälkeen hyvin merkittävä energian tuotannon päästöjen lisävähennyksen kannalta.

Metaanipäästöjä voidaan vuoden 2010 jälkeenkin edelleen vähentää jätehuollon kehittämisen keinoin. Toinen merkittävä ja kokonaistaloudellisesti edullinen yksittäinen päästöjen vähennyskohde on typpihapon valmistus, jossa N_2O -päästöjä voidaan rajoittaa katalyyttisin menetelmin arviolta noin 80 %. Tulosten mukaan myös fluorattujen kaasujen (HFC, PFC, SF₆) päästöjen tuntuva rajoittaminen on kokonaistaloudellisesti edullista. Jo vuoteen 2015 mennessä edullista vähennyspotentiaalia on noin 40 % perusuran mukaisesta määrästä, ja vuonna 2020 edullisimman potentiaalin osuus kasvaa lähes 50 %:iin. Korkeimpien hintojen skenaarioissa fluorattujen kaasujen päästöjä kannattaisi vähentää vuoteen 2050 mennessä noin 70 % perusurasta.

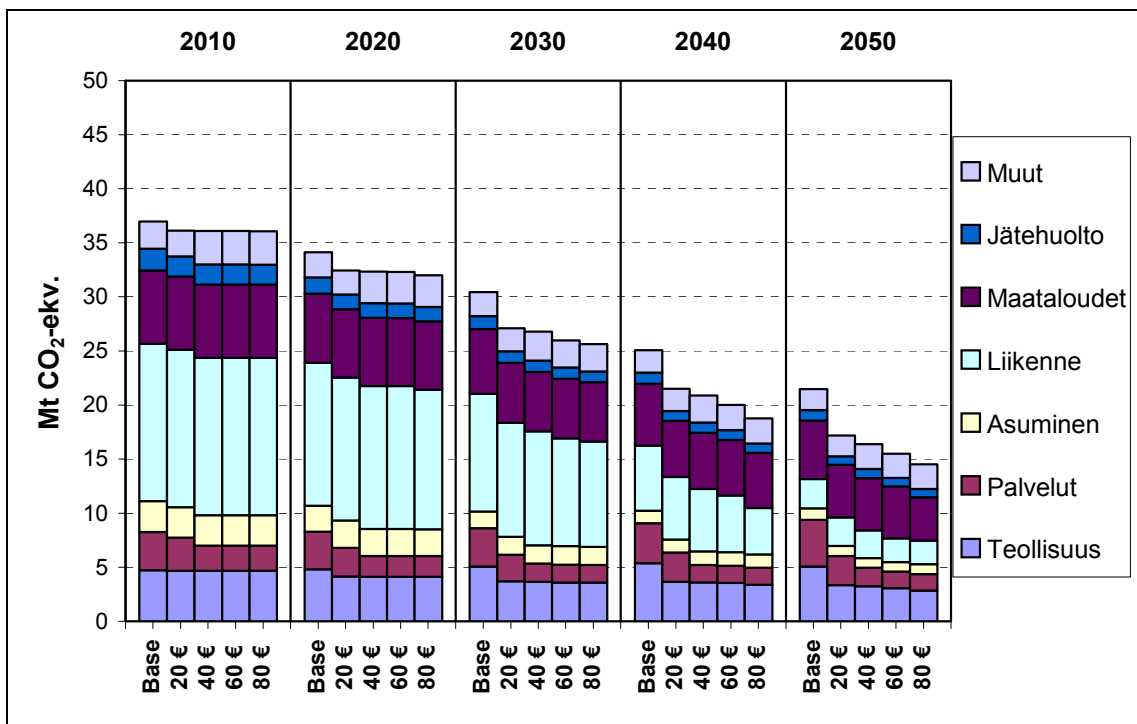
Rakennusten lämmityksessä on tulosten mukaan edullista lisätä kaukolämmön osuutta edelleen erityisesti palvelurakennusten lämmityksessä. Pientalojen lämmityksessä öljylämmitystä korvataan biopolttoaineilla ja lämpöpumppujärjestelmillä. Myös aurinkolämmityksellä on pientalojen lämmityksessä potentiaalia, mikäli kustannukset ovat kohtuullisia. Aurinkolämmitys lisääkin tuntuvasti markkinaosuuttaan tehostusskenaarioissa, joissa kustannuskehitys on oletettu edullisemmaksi.

Liikenteessä on merkittävää päästöjen vähennyspotentiaalia, mutta ajoneuvojen suurten pääoma- ja käyttökustannusten vuoksi päästötavoitteen tiukkuudella ei ole kovin merkittävää vaikutusta uusien ajoneuvotekniikoiden kilpailukykyyn. Skenaarioissa oletettiin polttokenno- ja sähköautojen tulevan joka tapauksessa kilpailukykyisiksi vuoden 2025 jälkeen, minkä ansiosta tavanomaiset moottoritekniikat väistyvät vuoteen 2050

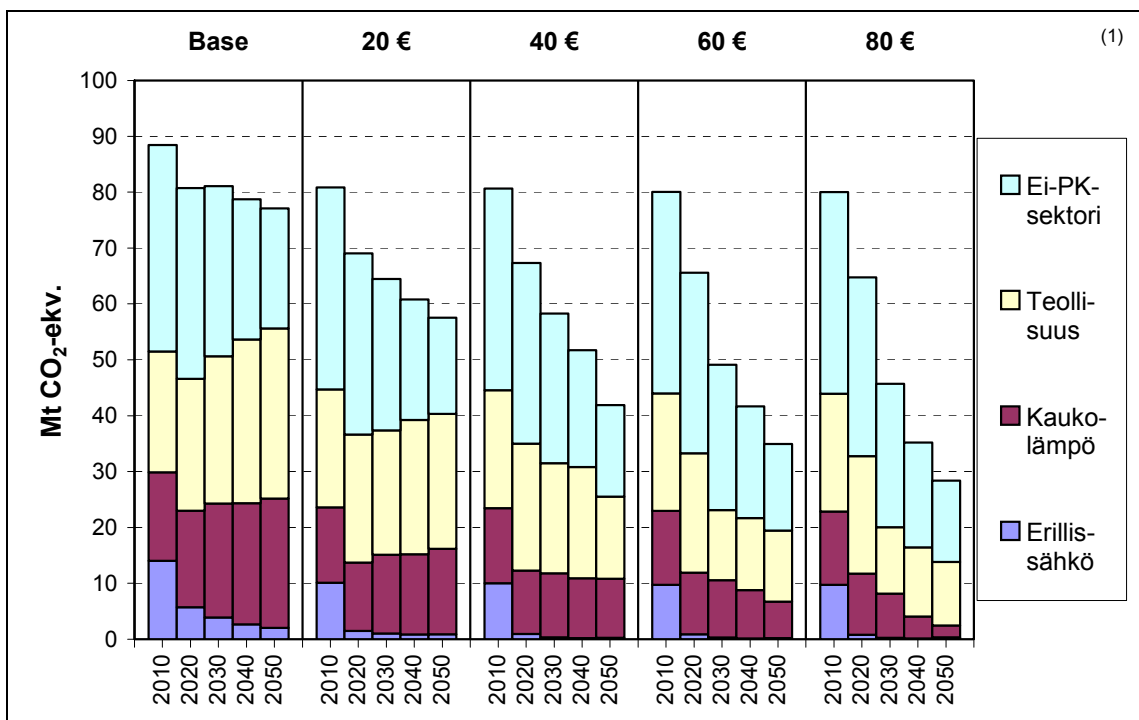
mennessä. Liikenteen ajoneuvotekniikoiden kehitys muodostaakin yhden suurimmista epävarmuustekijöistä pitkän tähtäimen voimakkaiden päästönvähennysten saavuttamiselle. Mikäli uudet tekniikat eivät saavutakaan kilpailukykyistä asemaa, liikenteen päästöt saattavat jäädä merkittävästi suuremmiksi.

Hiilidioksidin talteenottoteknologia tulee myös päästökauppaskenaarioissa käyttöön vuodesta 2030 lähtien niissä skenaarioissa, joissa päästöoikeuksien hinta on vähintään 40 €/tonni. Talteen otettujen CO₂-päästöjen määrä on perusskenaarioissa 9–13 milj. tonnia ja tehostusskenaarioissa 7–9 milj. tonnia vuonna 2050. Teknologia tulee käyttöön kaukolämpövoiman tuotannossa suurissa maakaasukombilaitoksissa, Raahen terästehtaalla, sementin ja vedyn valmistuksessa sekä joissakin tapauksissa lauhdevoiman tuotannossa. Hiilidioksidin talteenotolla on siis tulosten mukaan Suomessakin kohtuullisen merkittävä kokonaispotentiaali, mikäli vain kuljetukset loppusijoituspaikoille voidaan toteuttaa oletetuina kohtuullisin kustannuksin (noin 11 €/tonni).

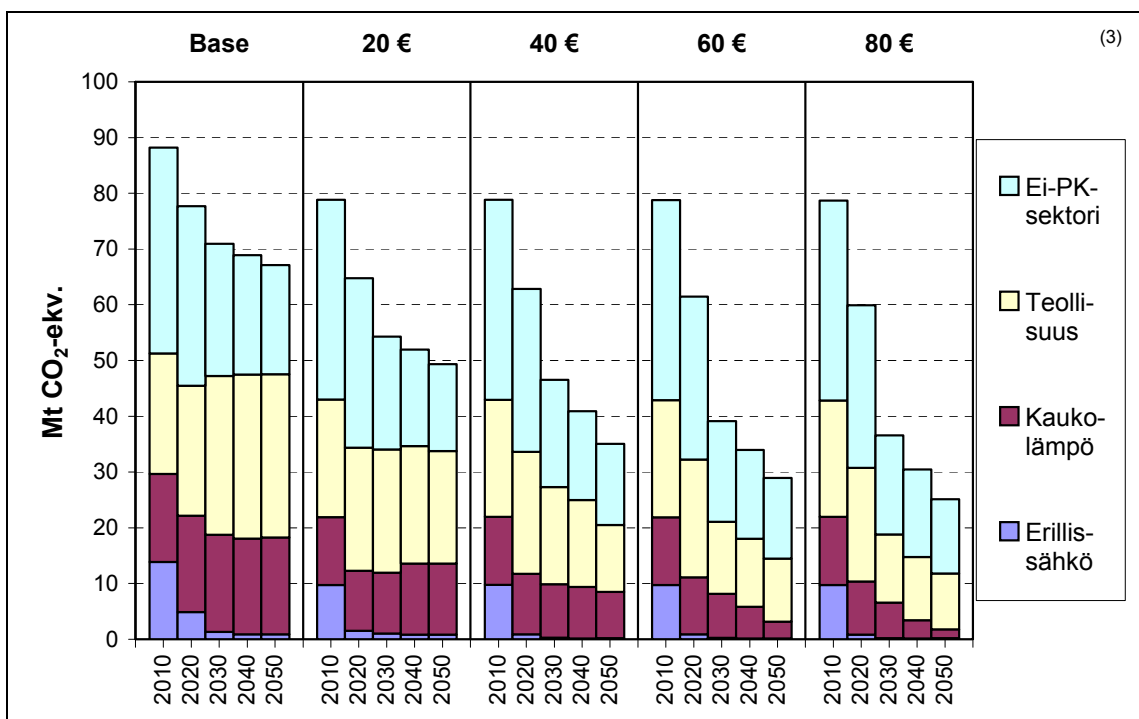
Kuvassa 27 on esitetty ns. ei-päästökauppasektoreiden päästöjen kehitys vuosina 2010–2050. Aiempien mallilaskelmien mukaan näillä sektoreilla on vain niukasti edullista päästöjen vähennyspotentiaalia. Tässä työssä erityisesti liikennettä koskevat oletukset mahdollistavat päästöjen merkittävän vähenemisen. Tuntuvia päästöjen vähennyksiä saadaan aikaan myös palveluissa (sis. F-kaasut), asumisessa ja kevyessä teollisuudessa. Päästö- ja ei-päästökauppasektoreiden päästöt on esitetty kuvissa 28–31 eri skenaarioissa.



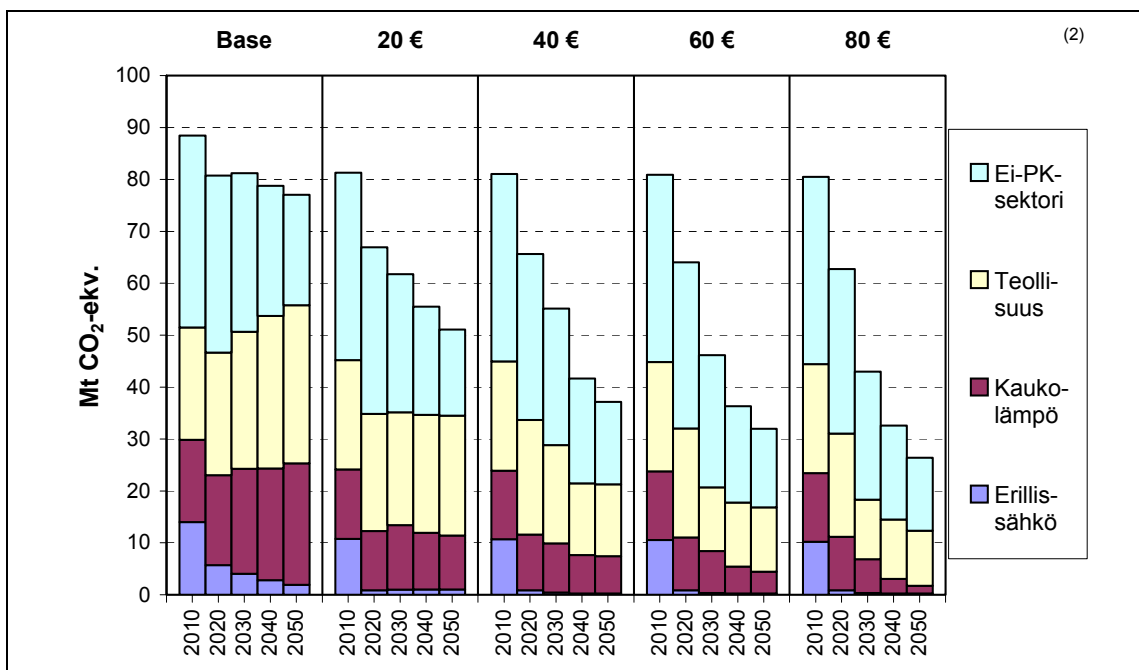
Kuva 27. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt EU:n nykyiseen päästökauppaan kuulumattomilla sektoreilla tarkastelluissa perusskenaarioissa A vuoteen 2050.



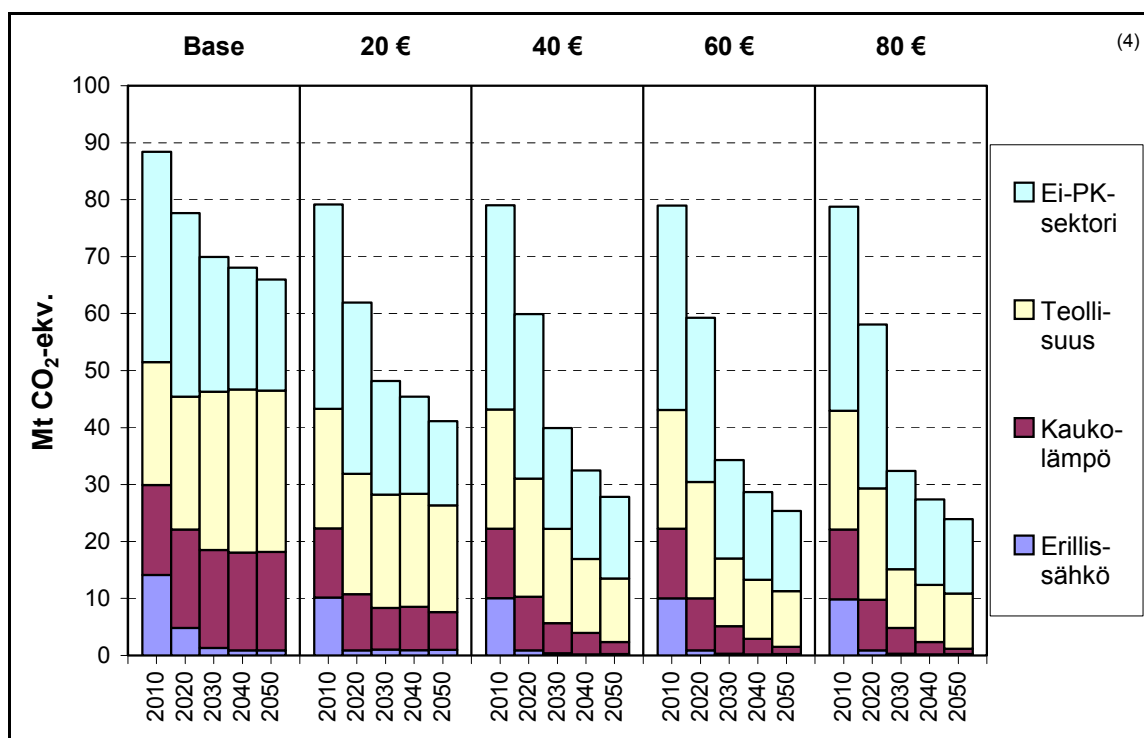
Kuva 28. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt EU:n päästökaupan piiriin kuuluvilla ja sen ulkopuolisilla sektoreilla perusskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästökaupahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 29. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt päästökaupan piiriin kuuluvilla ja sen ulkopuolisilla sektoreilla tehostusskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästökaupahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 30. Suomen kasviuonekaasujen päästöt päästökaupan piiriin kuuluvilla ja sen ulkopuolisilla sektoreilla perusskenaarioissa B vuoteen 2050. Päästökaupahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 31. Suomen kasviuonekaasujen päästöt päästökaupan piiriin kuuluvilla ja sen ulkopuolisilla sektoreilla tehostusskenaarioissa C vuoteen 2050. Päästökaupahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

4.9 Päästöjen vähentämisen suorat kustannukset

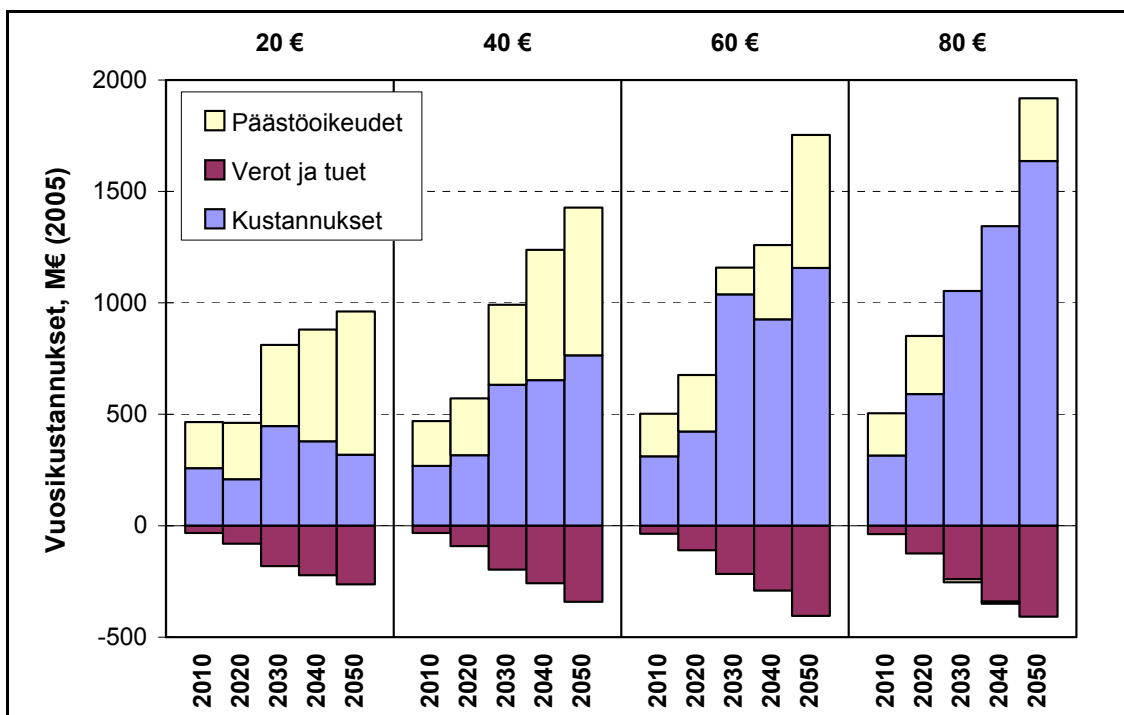
Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen aiheuttamia suoria kustannuksia voidaan arvioida vertaamalla kunkin päästökauppaskenaarion kustannuksia Baseline-skenaarion kustannuksiin. Kuvissa 32–35 on esitetty suorat vuosittaiset lisäkustannukset tarkastelluissa skenaariosarjoissa verrattuna Baseline-skenaarioihin (perus-Baseline ja tehostus-Baseline). Kuvissa on esitetty järjestelmäkustannusten lisäksi laskennalliset kustannukset tai tuotot päästöoikeuksien kaupasta olettaen Suomelle seuraavat hypoteettiset kansalliset päästötavoitteet (vähennyksinä vuoden 1990 tasosta):

- Kioton periodi: 0 %
- Vuonna 2020: 20 %
- Vuonna 2030: 35 %
- Vuonna 2040: 50 %
- Vuonna 2050: 65 %.

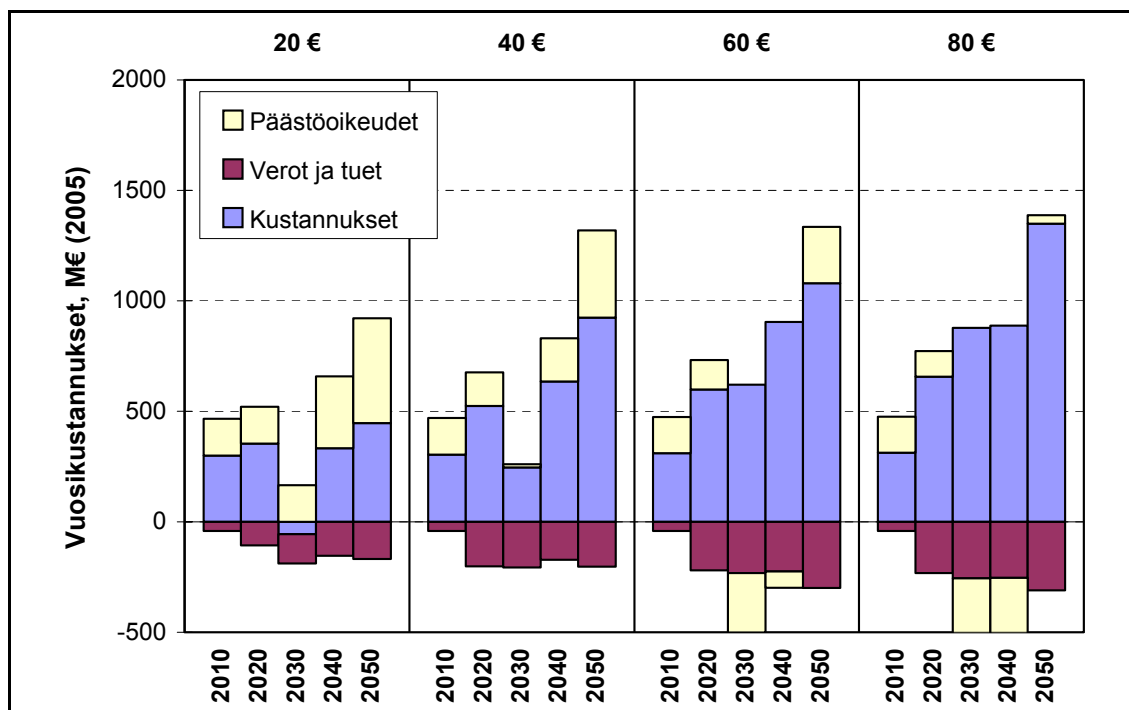
Suorat kustannukset sisältävät kaikki energiajärjestelmässä kuvattujen tuotantolaitosten ja käyttötekniikoiden investointi-, käyttö-, polttoaine- ja raaka-ainekustannukset sekä päästöoikeuksien kaupasta aiheutuvat kustannukset tai tuotot. Varsinaisten kustannusten lisäksi kuvissa on esitetty energiajärjestelmän eri toimijoiden vuosittain maksamien energiaverojen ja vastaanottamien tukien kokonaismäärän muutos verrattuna perusuraskenaarioon, siten että tukien summa on vähennetty verojen summasta. Päästötavoitteita koskevat hypoteettiset oletukset vaikuttavat ainoastaan laskennallisiin päästöoikeuksien kaupan kustannuksiin ja tuottoihin.

Tulosten mukaan suorat lisäkustannukset kasvavat tuntuvasti päästöoikeuden hinnan noustessa. Perusskenaarioissa suorat kustannukset ovat Kioton periodilla noin 460 miljoonaa euroa vuodessa, kun päästöoikeuden hinta nousee 20 €/t:iin vuoteen 2050 mennessä. Vuonna 2020 kustannukset ovat alimmillaan noin 460 M€, ja vuonna 2030 noin 810 M€. Korkeimmillaan kustannukset olisivat vuonna 2020 noin 850 M€ ja vuonna 2030 noin 1 150 M€. Vuonna 2050 kustannukset ovat vastaavasti alimmillaan noin 960 M€ ja ylimmillään noin 1 920 M€. Suurimmillaan kustannukset siis nousevat Kioton periodista varsin rajusti, yli viisinkertaisiksi vuoteen 2050 mennessä. Suorat kustannukset ovat tällöin noin 0,6 % bruttokansantuotteesta. Tulokset ovat tältä osin varsin hyvin yhteensopivia VTT:n globaalin TIMES-mallin Länsi-Eurooppaa koskevien kustannustulosten kanssa.

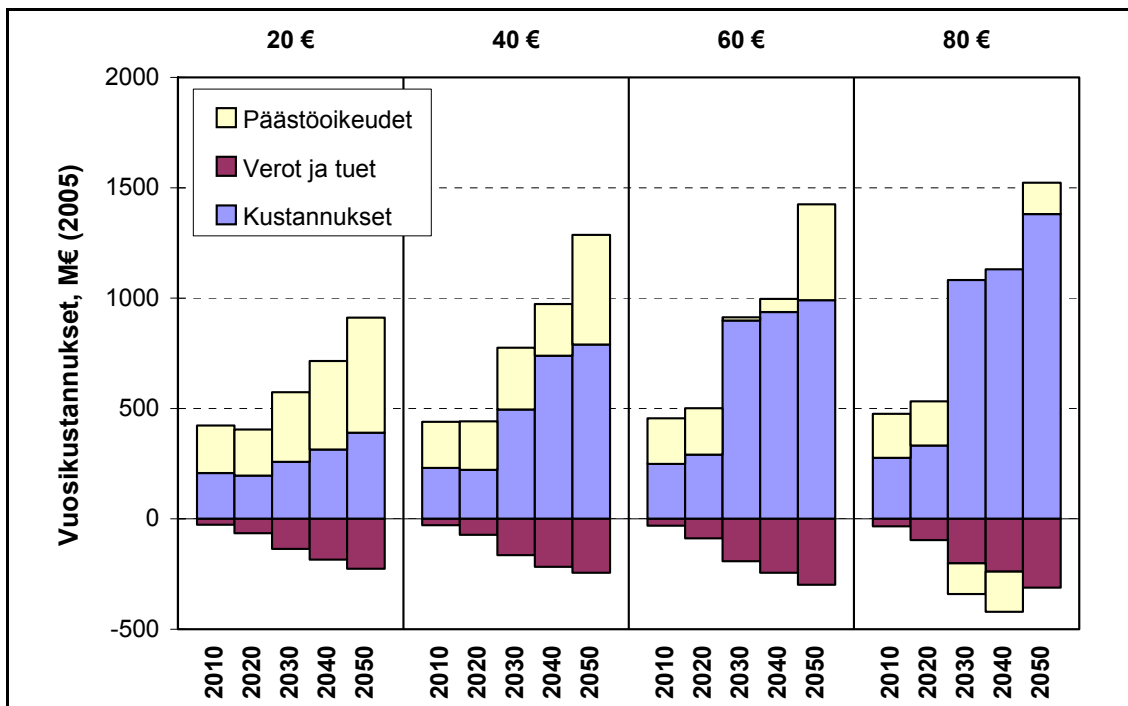
Tehostusskenaarioissa vuoden 2050 kustannukset jäävät voimakkaimmilla päästöjen vähennyksillä noin 30 % pienemmiksi. Ydinvoiman lisäämisen kannalta optimistisissa skenaarioissa kustannukset ovat myös merkittävästi alhaisemmat: 80 €:n vuonna 2050 perusskenaariossa B noin 22 % ja tehostusskenaariossa C yli 50 % pienemmät vuonna 2050.



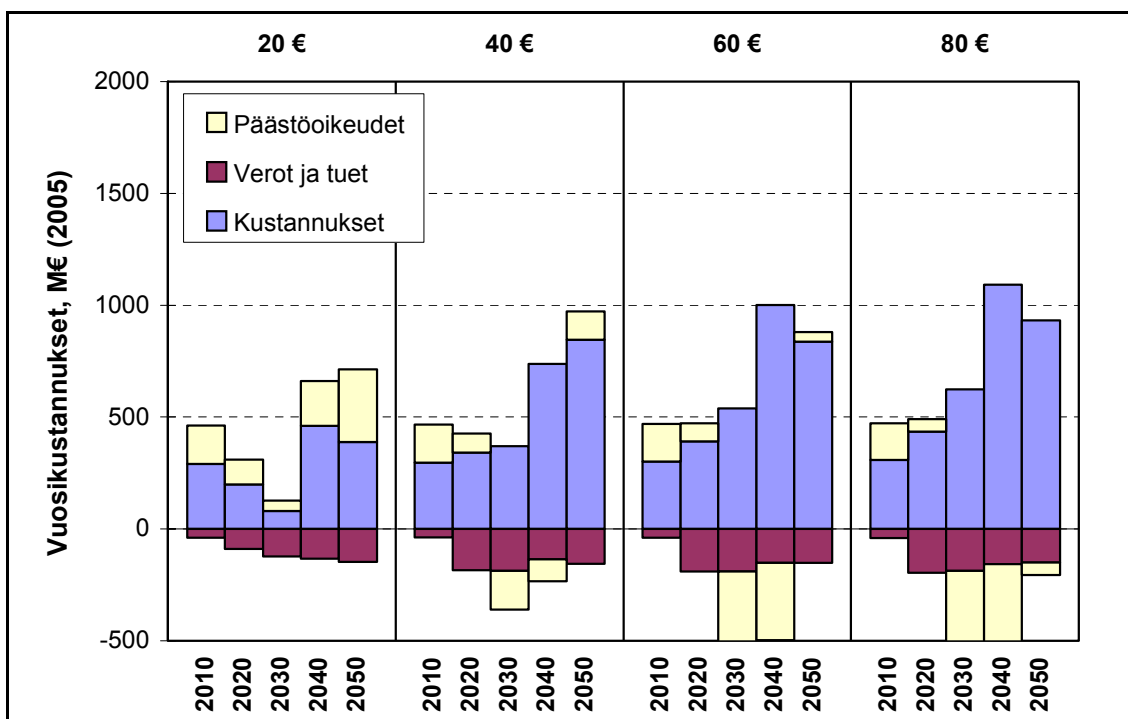
Kuva 32. Päästöjen rajoittamisen aiheuttamat suorat vuotuiset lisäkustannukset peruskaskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästöoikeuksien laskennallinen kustannus perustuu hypoteettiseen kansallisen päästötavoitteen mukaiseen kiintiöön.



Kuva 33. Päästöjen rajoittamisen aiheuttamat suorat vuotuiset lisäkustannukset tehostuskaskenaarioissa A vuoteen 2050. Päästöoikeuksien laskennallinen kustannus perustuu hypoteettiseen kansallisen päästötavoitteen mukaiseen kiintiöön.



Kuva 34. Päästöjen rajoittamisen aiheuttamat suorat vuotuiset lisäkustannukset peruskenaarioissa B vuoteen 2050. Päästöoikeuksien laskennallinen kustannus perustuu hypoteettiseen kansallisen päästötavoitteen mukaiseen kiintiöön.



Kuva 35. Päästöjen rajoittamisen aiheuttamat suorat vuotuiset lisäkustannukset tehostuskenaarioissa C vuoteen 2050. Päästöoikeuksien laskennallinen kustannus perustuu hypoteettiseen kansallisen päästötavoitteen mukaiseen kiintiöön.

5. Säästöinvestointien herkkyytarkastelu

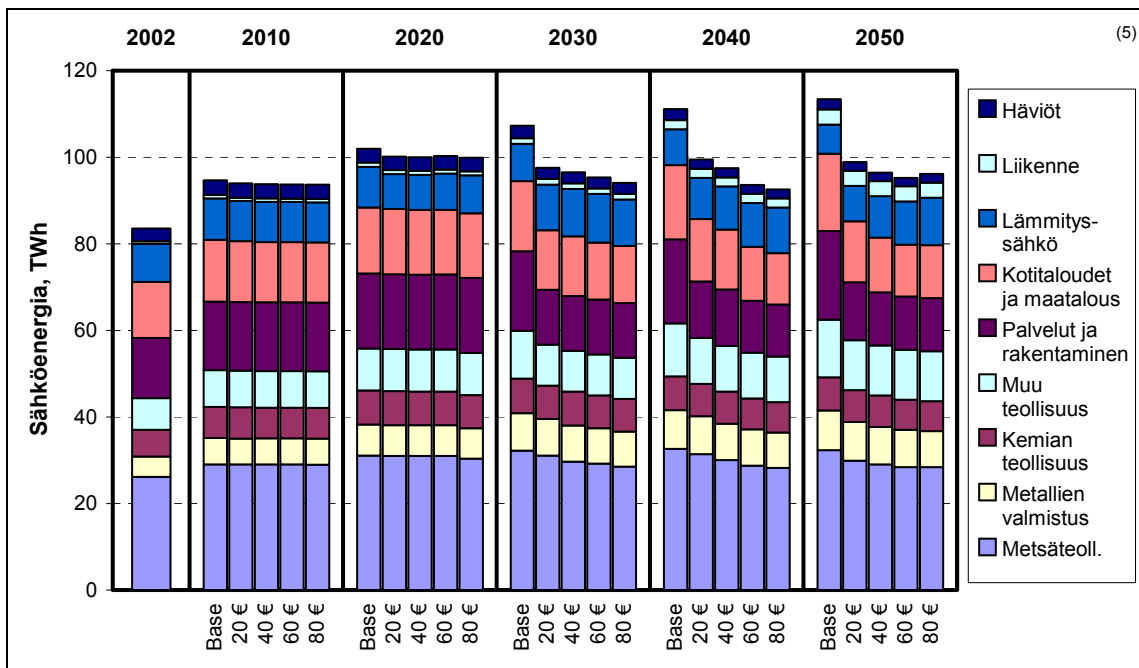
Rahoittajat asettavat energian käytön tehostamiseen kohdistuville investoinneille tavallisesti paljon suuremman tuottovaatimuksen kuin muille investoinneille. Tähän on syytä muun muassa se, että energian käyttö on esimerkiksi yrityksen päätoimialan kannalta vain yksi pieni kustannuserä, jonka tehostaminen ei ole keskeisiä liiketoiminnan päämääriä, eikä siihen siksi haluta panostaa ennen kuin odotettavissa olevat tuotot ovat merkittäviä. Tehostustoimien säästö tavoitteiden onnistumiseen voidaan katsoa myös liittyvän riskejä, jotka nostavat tuottovaatimusta. Erityisesti yksityisten kuluttajien käyttäytymiselle on tyypillistä, että energian käytön tehostamistoimen toteuttamiselle on varsin korkea kynnyks, sillä se vaatii usein paitsi tuntuvaan kertaluontoisen rahallisen panostuksen myös jonkin verran aikaa ja vaivaa. Energiajärjestelmämalleissa näitä tehostustoimien toteutumisen esteitä simuloidaan juuri olettamalla tehostustoimille tavallista korkeampi tuottovaatimus.

Koska oletetut säästöinvestointien tuottovaatimukset vaikuttavat merkittävästi energian käytön tehostamista koskeviin tuloksiin, työssä tehtiin herkkyytarkastelu tuottovaatimuksen osalta. Oletukset tuottovaatimuksista, joita käytettiin sekä perusskenaarioissa että tehostusskenaarioissa, ja vastaavat oletukset herkkyytarkastelussa on esitetty taulukossa 11. Herkkyytarkastelu tehtiin ainoastaan perusskenaarioille A. Tarkastelussa oletettiin alennetut tuottovaatimukset vuoden 2020 jälkeen.

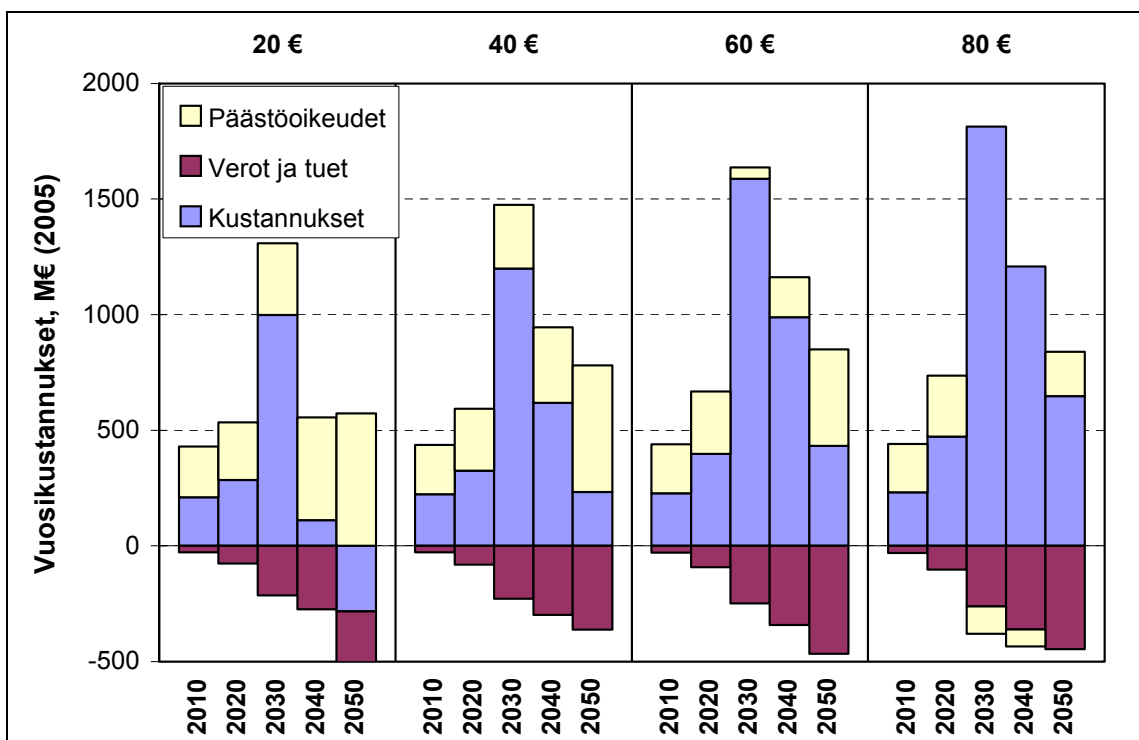
Taulukko 11. Säästöinvestointien tuottovaatimuksia koskevat oletukset.

Sektorit	Säästöinvestointien tuottovaatimus	
	Perusskenaariot	Herkkyytarkastelu
Metsäteollisuus	13 %	11 %
Perusmetalli ja kemia	14 %	11 %
Muu teollisuus	15 %	12 %
Palvelut	25 %	15 %
Kotitaloudet	25 %	15 %
Rakentaminen	7 %	6 %

Sähkön kokonaiskulutuksen kehitys säästöinvestointien alhaisemmilla tuottovaatimuksilla on esitetty kuvassa 36. Tulosten mukaan kokonaiskulutus on vuonna 2050 korkeimman päästöoikeuksien hinnan tapauksessa noin 96 TWh eli lähes samansuuruinen kuin vastaavassa tehostusskenaariossa. Myös kasvihuonekaasujen päästöjen kehitys oli herkkyytarkastelun tuloksissa suunnilleen samanlainen kuin tehostusskenaarioissa. Herkkyytarkastelun mukaiset koko energiajärjestelmän vuotuiset suorat kustannukset on puolestaan esitetty kuvassa 37. Tuloksista näkyy selvästi vuonna 2030 voimakas investointi tehostustoimiin, joiden kustannukset kompensoituvat sen jälkeen selvästi alemmina kustannuksina.



Kuva 36. Sähköenergian kokonaiskulutus peruskenaarioissa A vuosina 2002–2050 säästöninvestointien herkkyystarkastelussa. Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.



Kuva 37. Päästöjen rajoittamisen aiheuttamat suorat vuotuiset lisäkustannukset peruskenaarioissa A säästöninvestointien herkkyystarkastelussa Päästökauppahinnat viittaavat vuoteen 2050, johon taso nousee lineaarisesti.

Herkkyysanalyysin tulokset osoittavat, että työssä tarkasteltujen tehostusskenaarioiden keskeinen oletus alenevista tehostustoimien kustannuksista voitaisiin perustella pelkästään olettamalla energiapolitiikan tavoitteeksi kuluttajien ja yritysten energiatietoisuuden parantamisella aikaan saatava ylisuurten tuottovaatimusten aleneminen. Tässä mielessä tehostusskenaarioita ei siis voi pitää liian optimistisina.

6. Yhteenveto

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi maailman kasvihuonekaasujen päästöjä tulee rajoittaa tämän vuosisadan puoliväliin mennessä 50–85 prosenttia alle vuoden 2000 tason (IPCC 2007), jos tavoitteena on maapallon keskilämpötilan nousun rajoittaminen kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden EU:n ehdotuksen mukaisesti. Teollisuusmaiden on mitä todennäköisimmin vähennettävä päästöjä enemmän kuin maailman keskimäärin. EU on varautunut rajoittamaan päästöjä 60–80 % alle vuoden 1990 tason vuoteen 2050 mennessä.

VTT:n Suomen TIMES-energiajärjestelmämallilla laadittiin skenaarioita Suomen kasvihuonekaasujen kustannustehokkaaksi päästöjen vähentämiseksi vuoteen 2050 asti. Teknologian kehitystä arvioitiin kahdella vaihtoehdolla: konventionaalisella peruskehitysarviolla sekä optimistisemmalla vaihtoehdolla, jossa on oletettu tehostuneet tutkimus- ja kehityspanokset sekä energian käytön tehostamisen edistäminen. Arviot perustuvat sekä VTT:n aiempaan työhön että tämän työn yhteydessä tehtyyn laajaan Teknologiapolut 2050 -katsaukseen (Savolainen et al. 2008). Suomen energiajärjestelmän kehitystä on arvioitu olettamalla erilaisia vaihtoehtoja keskeisimpien raportin laadintahetkellä avoimna olevien päästöjä vähentävien vaihtoehtojen kehitykselle (mm. mahdollinen ydinvoiman lisärakentaminen). Keskeisenä kehitystä ajavana voimana työssä oletettiin että kansainvälinen päästökauppa jatkuu, ja päästökaupan hintakehitykselle on oletettu useita vaihtoehtoisia kehityskulkuja.

Tulosten mukaan Suomessa voitaisiin vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä 60–66 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jos päästöoikeuksien hinta on korkeintaan 80 €/t(CO₂-ekv.). Tämä hintataso valittiin tarkastelussa korkeimmaksi, sillä useiden muiden selvitysten (esim. Koljonen et al. 2008) mukaan kansainvälisessä päästökaupassa hinta voi nousta tälle tasolle vuoteen 2050 mennessä. Jos siis Suomea koskevat päästöjen vähentämistavoitteet olisivat vielä tiukempia, kannattaisi kotimaisten toimien sijasta ostaa päästöoikeuksia.

Keskeisimpiä teknologioita päästöjen vähentämisessä ovat bioenergia, ydinvoima ja tuulivoima. Aurinkoenergia jää tulosten mukaan vielä hyvin marginaaliseen osaan ainakin aurinkosähkön osalta. Aurinkolämmityksellä on kuitenkin potentiaalia kiinteistöjen lämmityksessä.

Ydinvoiman voimakas lisärakentaminen ei tulosten mukaan merkittävästi pienennä vuonna 2050 saavutettavissa olevaa päästötasoa. Sen sijaan ydinvoiman lisääminen alentaa merkittävästi päästöjen rajoittamisen kustannuksia ja voi myös alentaa sähkön markkinahintaa huomattavasti. Pitkän aikavälin ydinvoiman lisäämisskenaarioissa on kuitenkin käytännössä huomattavia epävarmuuksia liittyen mm. teknologian kehittymiseen

ja poliittisiin ratkaisuihin. Toisaalta esitetyissä skenaariotarkasteluissa ei oteta huomioon ydinvoiman mahdollisesti laajenevaa käyttöä sähköntuotannon ohella myös muiden energiankantajien (mm. synteettiset biomassaperusteiset liikennepolttoaineet ja vety) tuotantoon. Tarkastelluissa skenaarioissa ydinvoiman lisäämisen alentava vaikutus sähkön hintaan oli jonkin verran ylikorostunut, sillä sähkön vuositasoista nettovientä ei sallittu.

On huomattava, että tarkastelun tuloksissa saavutettuun päästötasoon vaikuttaa merkittävänä epävarmuustekijänä liikenteen teknologiakehitys. Mikäli vähäpäästöisen ajoneuvotekniikan kehitys ei vastaakaan tarkastelun oletuksia, liikenteen päästöjen väheneminen voi olla huomattavasti hitaampaa. Toisaalta jos kansainvälisesti tullaan sopimaan kehittyneiden maiden hyvin tiukoista päästötavoitteista, niin tällöin on odotettavissa, että ajoneuvoteknologiassa on välttämättä tapahduttava jonkinlainen teknologiahyppäys.

Toinen merkittävä epävarmuustekijä tuloksissa on CCS-tekniikan realistinen potentiaali ja kustannukset Suomessa. Hiilidioksidin talteenoton osuus päästöjen vähentämisessä oli korkeimmilla päästöoikeuksien hinnoilla 7–13 milj. tonnia CO₂, mikä on jo varsin huomattava määrä.

Vähäpäästöisillä tuotantomuodoilla (erityisesti tuulivoima ja ydinvoima) voidaan alen-
taa paitsi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen kustannuksia, myös vähentää rikki-,
typpioksid- ja hiukkaspäästöjä, riippuvuutta tuontisähköstä sekä pienentää fossiilisten
polttoaineiden kustannusten noususta aiheutuvaa epävarmuutta.

Energiansäästö ja loppukäytön energiatehokkuus ovat kuitenkin välttämättömiä tuotan-
non tehokkuuden ohella: mikäli nykyistä energian tuhlaavaa käyttöä ei pystytä rajoitta-
maan tehokkaasti kaikkialla maailmassa, mitkään todennäköisesti lähivuosikymmeninä
saatavilla olevat vähäpäästöiset energiantuotantoteknologiat eivät riitä hillitsemään
päästöjä vaadittavassa mitassa. Tämä skenaariotarkastelu keskittyi teknologiaan, mutta
myös kulutustottumuksia on muutettava voimakkaasti: on suuntauduttava voimakkaasti
kohti vähän päästöjä aiheuttavaa kulutusta.

Maatalouden päästöt pienenevät tarkastelussa suhteellisen vähän. Voidaan olettaa, että
tähän sektoriin liittyviä päästörajoitustoimia on selvitetty toistaiseksi melko rajoitetusti.
Maankäytöstä aiheutuvia päästöjä ja niiden vähentämistä ei tarkasteltu tässä työssä.
Maankäyttö voi tarjota päästöjen vähentämisen lisäksi myös mahdollisuuden kerätä
ilmakehästä hiilidioksidia ekosysteemin, lähinnä metsän, muodostamaan hiilivarastoon
(ns. nielu).

Teknologialle jää silti todennäköisesti erittäin merkittävä osa päästöjen vähentämisessä.
Tämä vaatii voimakasta panostusta tehokkaiden ja vähäpäästöisten energian tuotanto- ja

käyttöteknologioiden kehittämiseen ja tehokkaaseen markkinoille saattamiseen. EU on hiljattain tehnyt omat linjauksensa näihin haasteisiin vastaamiseksi.

Teknologian keinoja päästöjen vähentämiseksi on jo olemassa ja heti saatavilla hyvin runsaasti eri sektoreilla. Päästöjen vähennystavoitteiden saavuttamiseksi on tärkeää, että näitä keinoja saadaan viipymättä otettua käyttöön. Kaikkialla maailmassa käynnissä oleva muutos kohti päästöttömämpiä teknologioita tuo myös suuria mahdollisuuksia uuden ja tehokkaan teknologian viennille.

Lähdeluettelo

Criqui, P., Russ, P. & Debye, D. 2006. Impacts of multi-gas strategies for greenhouse gas emission abatement: Insights from a partial equilibrium model. *The Energy Journal*, Vol. Multi-gas Mitigation and Climate Policy, Special Issue, No. 3, s. 251–274.

Energiateollisuus 2005. Vesivoimatuotannon määrä ja lisäämismahdollisuudet Suomessa. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiateollisuus. [http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/6638E6EBAA886908C225701900465F55/\\$file/334642004.pdf](http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/6638E6EBAA886908C225701900465F55/$file/334642004.pdf)

Forsström, J. & Lehtilä, A. 2005. Skenaarioita ilmastopolitiikan vaikutuksista energiatalouteen. VTT, Espoo. VTT Working Papers 36. 71 s. + liitt. 9 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/W36.pdf>.

Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T. & Matsuoka, Y. 2006. Multigas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *The Energy Journal*, Vol. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, Special Issue, No. 3, s. 343–354.

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

IEA 2005. Projected Costs of Generating Electricity, 2005 Update. Joint Report, International Energy Agency and Nuclear Energy Agency. Paris: OECD.

IEA 2007. World Energy Outlook 2007. Paris: International Energy Agency.

IPCC 2007. Climate Change 2007. Mitigation of climate change. Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>.

Kekkonen, V. & Pursiheimo, E. 2005. Selvitys sähkön tuontimahdollisuuksista Suomeen pohjoismaisilta sähkömarkkinoilta. VTT, Espoo. VTT Working Papers 16. 39 s. + liitt. 53 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/W16.pdf>.

Keppo, I., O'Neill, B. & Riahi, K. 2006. Probabilistic temperature change projections and energy system implications of greenhouse gas emission scenarios. *Technological Forecasting and Social Change*, Special Issue, 74(8–9).

Koljonen, T., Lehtilä, A., Savolainen, I., Flyktman, M., Peltola, E., Pohjola, J., Liski, M., Ahonen, H.M. & Laine, A. 2008. Suomalaisen puhtaan energiateknologian kysyntä muuttuvassa ilmastopolitiikassa. SETELI-hankkeen loppuraportti [The demand of Finnish clean energy technologies under developing climate policies]. VTT, Espoo (painossa).

Korhonen, A., Pihala, H., Ranne, A., Ahponen, V. & Sillanpää, L. 2002. Kotitalouksien ja toimistotilojen laitesähkön käytön tehostaminen. Työtehoseuran julkaisuja 384.

Kypreos, S. 2006. Stabilizing global temperature change below thresholds; A Monte Carlo analyses with MERGE. Paul Scherrer Institut, Villigen. 28 s. Accessed 1 June 2007. http://eem.web.psi.ch/Publications/Books_Journals/2006_Kypreos_stabilizing_with_merge.pdf.

Lehtilä, A. & Tuhkanen, S. 1999. Integrated cost-effectiveness analysis of greenhouse gas emission abatement. The case of Finland. VTT, Espoo. VTT Publications 374. 144 s. + liitt. 15 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P374.pdf>.

Lehtilä, A. & Syri, S. 2003. Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita. Climtech-ohjelman skenaariotarkastelu. VTT, Espoo. VTT Tiedotteita 2196. 62 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2196.pdf>.

Lehtilä, A., Savolainen, I. & Syri, S. 2005. The role of technology development in greenhouse gas emissions reduction: The case of Finland. Energy, Vol. 30, No. 14, s. 2738–2758.

Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtilä, A. & Goldstein, G. 2005. Documentation for the TIMES Model. Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), April 2005. <http://www.etsap.org/documentation.asp>.

Marttila, V., Granholm, H., Laanikari, J., Yrjölä, T., Aalto, A., Heikinheimo, P., Honkatukia, J., Järvinen, H., Liski, J., Merivirta, R. & Paunio, M. 2005. Ilmastonmuutoksen kansallinen sopeutusstrategia. Helsinki: Maa- ja metsätalousministeriö, MMM:n julkaisuja 1/2005. 272 s.

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

Ohlström, M. & Savolainen, I. (toim.) 2005. Teknologiaa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Taustatyö kansallisen ilmastostrategian päivitystä varten. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, Julkaisuja 1/2005.

Peltola, E. 2002. Tuulivoiman investointikustannusarviot, julkaisematon Excel-taulukko Climtech-skenaarioita varten.

Pope, V.D., Gallani, M.L., Rowntree, P.R. & Stratton, R.A. 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics* 16, s. 123–146.

Riahi, K., Grübler, A. & Nakićenović, N. 2006. Scenarios of long term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, Special Issue, 74(8–9). doi-link: [doi:10.1016/j.techfore.2006.05.026](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026).

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.

Savolainen, I., Similä, L., Syri, S. & Ohlström M. (toim.) 2008. Teknologiapolut 2050. Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian laatimista varten. VTT, Espoo. 215 s. VTT Tiedotteita 2432. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2432.pdf>.

Stern 2006. Stern Review of Climate Change. H. M. Treasury. http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm.

Syri, S., Lehtilä, A., Ekholm, T., Savolainen, I., Holttinen, H. & Peltola, E. 2008. Global energy and emissions scenarios for effective climate change mitigation – Deterministic and stochastic scenarios with the TIAM model. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Vol. 2, No. 2, s. 274–285. doi-link: [10.1016/j.ijggc.2008.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.01.001).

Tammelin, B., Forsius, J., Jylhä, K., Järvinen, P., Koskela, J., Tuomenvirta, H., Turunen, M., Vehviläinen, B. & Venäläinen, A. 2002. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia energiantuotantoon ja lämmitysenergian tarpeeseen. ILMAVA-hankkeen loppuraportti. Ilmatieteen laitos, No. 2002:2, Helsinki.

Tilastokeskus 2008. Energiatilasto. Vuosikirja 2007. Helsinki: Tilastokeskus, Energia 2007.

Van Vuuren, D.P., den Elzen, M.G.J., Lucas, P.L., Eickhout, B., Strengers, B.J., van Ruijven, B., Wonink, S. & van Houdt, R. 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, 81(2), s. 119–159.

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>.

Vehviläinen B. & Huttunen M. 1997. Climate change and water resources in Finland. Boreal Environment Research 2, s. 3–18.

Vesisuunnittelu 2005. Pienvesivoimakartoitus: Minivesivoimasektori <1MW. PR Vesisuunnittelu Oy, kauppaja- ja teollisuusministeriölle tehty selvitys, KTM Dnro 58/804/2004.

Vesirakentaja 2008. Voimaa vedestä 2007. Selvitys vesivoiman lisäämismahdollisuuksista. Oy Vesirakentaja, Tammikuu 2008. <http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/liitteet/voimaa%20vedest%c3%a4%202007%20final%20nettiversio%20080208.pdf?SectionUri=%2ffi%2fjulkaisut>.

Tekijä(t) Lehtilä, Antti, Syri, Sanna & Savolainen, Ilkka		
Nimeke Teknologiapolut 2050 Skenaariotarkastelu kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa		
Tiivistelmä <p>Tässä raportissa esitellään skenaarioita Suomen kasvihuonekaasujen kustannustehokkaaksi päästöjen vähentämiseksi vuoteen 2050 asti. Skenaariot on laadittu VTT:n Suomen TIMES-energiajärjestelmämallilla. Työssä arvioidaan, miten Suomi voisi erilaisissa teknologian, energiajärjestelmän ja päästökaupan kehityskuluissa vastata hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC:n) arvioon, jonka mukaan ilmastonmuutoksen tehokkaaksi hillitsemiseksi vaaditaan 50–85 %:n kasvihuonekaasupäästöjen vähennys vuosisadan puoliväliin mennessä sekä EU:n tavoitteeseen päästöjen vähentämisestä 60–80 % vuoteen 2050 mennessä.</p> <p>Tulosten mukaan Suomessa voitaisiin vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä 60–66 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jos päästöoikeuksien hinta on korkeintaan 80 €/t(CO₂-ekv.). Teknologian keinoja päästöjen vähentämiseksi on olemassa runsaasti erilaisia kaikilla sektoreilla. Päästöjä vähentävien teknologioiden käyttöönottoa hidastavat kuitenkin kustannukset ja investointien uusiutumisen hitaus. Energian käytön tehostuminen nousee tärkeäksi tekijäksi Suomen päästöjen vähentämisessä vuoteen 2050 asti. Keskeisiä päästöjä vähentäviä tuotantoteknologioita ovat bioenergiateknologiat, tuulivoima ja ydinvoima, joiden kustannustehokas toteutumismäärä riippuu oletetusta päästökaupan hintakehityksestä, teknologian kehityksestä sekä mahdollisista muista rajoitteista.</p> <p>Vuoteen 2050 mennessä myös Suomen ilmasto tulee muuttumaan tuntuvasti. Tämä vaikuttaa vähentäen lämmitystarvetta, lisäten jäähdytystarvetta sekä lisäten tuulivoiman ja vesivoiman tuotantopotentiaalia.</p>		
ISBN 978-951-38-7226-7 (nid.) 978-951-38-7227-4 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 2433 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 23292
Julkaisuaika Syyskuu 2008	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 65 s.
Projektin nimi Teknologiapolut 2050		Toimeksiantaja(t) Tekes, TEM
Avainsanat energy scenario, technology, deep emission reductions, climate change mitigation, energy use, energy production		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374

Author(s) Lehtilä, Antti, Syri, Sanna & Savolainen, Ilkka		
Title Technology pathways 2050 Scenarios on deep greenhouse gas emissions reductions in Finland		
Abstract <p>This report presents scenario calculations for the Finnish energy system using the TIMES energy system model available at VTT. The calculations provide estimates, which technologies would be economically optimal to apply in order to reach the emission reduction targets. Scenarios have been developed for alternative development pathways of technology, the Finnish energy system and international emissions trading. The aim of the scenarios was to estimate, how Finland could respond to the recent IPCC estimate that effective mitigate climate change mitigation requires global emissions reductions in the order of 50–85% by the year 2050, and to the EU goals of reducing emissions by 60–80% by the year 2050.</p> <p>In Finland, GHG emissions can be reduced by 60–66 % from 1990 to 2050, if emission allowance prices remain less than 80 €/t(CO₂-ekv.) Increased energy use efficiency becomes an important factor in emissions reductions by 2050. Key reduction technologies in energy production are bioenergy technologies, wind power and nuclear power. The cost-efficient amount of these technologies in the Finnish energy system varies depending on assumptions of emissions trading price development, technology development and other possible constraints. By the year 2050, also the Finnish climate will change considerably. The heating requirement decreases, cooling needs increase, and wind power and hydro power potentials increase. A major part of the technology opportunities are already on the market and therefore immediately applicable. The adoption is restricted by costs and long investment cycles in many of the applications.</p>		
ISBN 978-951-38-7226-7 (soft back ed.) 978-951-38-7227-4 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 2433 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 23292
Date September 2008	Language Finnish, English abstr.	Pages 65 p.
Name of project Technology Pathways 2050		Commissioned by Tekes, TEM
Keywords energy scenario, technology, deep emission reductions, climate change mitigation, energy use, energy production		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374

Julkaisussa esitellään skenaarioita Suomen kasvihuonekaasujen kustannus-
tehokkaaksi päästöjen vähentämiseksi vuoteen 2050 asti. Skenaariot on
laadittu VTT:n Suomen TIMES-energiajärjestelmämallilla. Työssä arvioi-
daan, miten Suomi voisi erilaisissa teknologian, energiajärjestelmän ja
päästökaupan kehityskuluissa vastata hallitustenvälisen ilmastonmuutos-
paneelin (IPCC:n) arvioon ilmastonmuutoksen tehokkaasta hillitsemisestä
ja EU:n tavoitteeseen vähentää päästöjä 60–80 % vuoteen 2050 mennessä.
Tulosten mukaan Suomessa voitaisiin vähentää kasvihuonekaasujen pääs-
töjä 60–66 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jos päästöoi-
keuksien hinta on korkeintaan 80 €/t(CO₂-ekv.). Energian käytön tehostu-
minen nousee tärkeäksi tekijäksi Suomen päästöjen vähentämisessä vuo-
teen 2050 asti. Keskeisiä päästöjä vähentäviä tuotantoteknologioita ovat
bioenergiateknologiat, tuulivoima ja ydinvoima.

Julkaisu on saatavana

VTT
PL 1000
02044 VTT
Puh. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

Publikationen distribueras av

VTT
PB 1000
02044 VTT
Tel. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

This publication is available from

VTT
P.O. Box 1000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4520
<http://www.vtt.fi>