

# EU:n yksipuolinen päästöjen rajoittaminen ja kehittyneiden maiden yhteinen päästöjen rajoittaminen

Vaikutukset Suomeen arvioituna  
TIMES-mallilla

Tommi Ekholm, Antti Lehtilä & Ilkka Savolainen

ISBN 978-951-38-7156-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 1459-7683 (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: TIMES-mallin yksinkertaistettu rakennekaavio.*

Tekijä(t) Ekholm, Tommi, Lehtilä, Antti & Savolainen, Ilkka		
Nimeke <b>EU:n yksipuolinen päästöjen rajoittaminen ja kehittyneiden maiden yhteinen päästöjen rajoittaminen</b> <b>Vaikutukset Suomeen arvioituna TIMES-mallilla</b>		
Tiivistelmä Tutkimuksessa tarkastellaan EU:n ehdottaman yksipuolisen kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen vaikutuksia Euroopan ja Suomen energiantuotannon rakenteeseen TIMES-malleilla. Kyseiset mallit ovat teknistaloudellisia energijärjestelmämalleja, joissa on laaja kuvaus energiantuotannon ja käytön teknologioista. Malleissa käytetään lähtötietona talousskenaarioita, jotka kuvaavat kysyntää eri sektoreilla. Mallit laskevat markkinatasapainon perusteella optimaalisen tavan tyydyttää kysyntä ja täyttää annetut muut rajoitteet.  Eurooppaa koskevilla laskelmissa käytettiin lähtökohtana ns. Common POLES-IMAGE -talousskenaariota, jossa BKT kasvaa keskimäärin 2,4 % vuodessa vuoteen 2020 saakka. Herkkyystarkasteluja tehtiin myös alemman kasvun talousskenaariolla. Mallilaskelmien tulosten mukaan EU:n päästöjen rajoittaminen 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä vuoden 1990 tasosta kohdistaisi toimet pääosin sähköntuotantosektoriin. Hiilen käyttö sähköntuotannossa vähenisi voimakkaasti. Pidemmällä aikavälillä osa maakaasuun perustuvasta tuotannosta kytkettäisiin hiilidioksidin erotukseen ja varastointiin (CCS). Tuulienergian käyttö lisääntyisi voimakkaasti. Päästöoikeuden hinta nousisi mallilaskelmien mukaan vuoden 2020 kohdalla tasolle 25–30 €/tCO <sub>2</sub> , jos päästöjä rajoitetaan ilman joustomekanismeja. Jos EU:n päästörajoitustavoite vuonna 2050 on noin 30 %, nousisi hinta tasolle 40–50 €, jos rajoitustavoite on 60 %, päästöyksikön hinta olisi luokkaa 100 €.  Suomea koskevat tarkastelut perustuvat valtionvarainministeriön ja Valtion taloudellisen tutkimuskeskuksen kansantalouden kehitysarvioon. Laskelmissa tarkasteltiin optimaalista päästöjen rajoittamista, kun päästökaupan hinnaksi oletetaan 20, 30, 40 ja 50 €/tCO <sub>2</sub> ja ei-päästökaupasektorilla tehdään vastaavaa kustannustasoa olevat päästörajoitustoimet. Tulosten mukaan kivihiilen käyttö lähtee vähenemään kaikissa hintaskenaarioissa vuoden 2010 jälkeen, ja toisaalta maakaasun käyttö kasvaa. Bioenergian hyödyntäminen kasvaa kokonaisenergiataseessa merkittävästi. Myös tuulivoiman hyödyntäminen lisääntyy voimakkaasti. Hiilidioksidin talteenotto alkaa korkeammilla hintatasoilla vuoden 2020 jälkeen. Päästöjen suhteelliset muutokset ovat suurimpia erillisessä sähköntuotannossa.  Rakennuskanta kasvaa merkittävästi, mutta lämmitysenergian kulutus kääntyy jopa pieneen laskuun. Liikenteen biokomponenttien lisääminen tulee yhä kannattavammaksi päästöoikeuksien hinnan noustessa. Päästökaupan ulkopuolelle jäävillä sektoreilla päästöjen väheneminen toimenpiteiden kustannustason noustessa on melko vähäistä.  Jos Suomen päästövähennystavoite on 20 % vuonna 2020, niin Suomi ostaisi päästöoikeuksia kaikilla tarkastelussa olleilla hintatasoilla. Jos vähennystavoite on 10 %, niin kalleimmilla hintatasoilla suomalaisten yritysten kannattaisi myydä päästöoikeuksia tarkasteluvälän loppupuolella. Työssä on myös arvioitu päästöjen rajoittamisen suoraa kustannuksia huomioon ottaen investointi-, käyttö-, polttoaine- ja raaka-ainekustannukset sekä päästöoikeuksien kaupan kustannukset tai tuotot.		
ISBN 978-951-38-7156-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinnumero 15904
Julkaisuaika Maaliskuu 2008	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 57 s.
Projektin nimi EU:n yksipuolinen päästöjen rajoittaminen ja kehittyneiden maiden yhteinen päästöjen rajoittaminen – vaikutukset Suomeen arvioituna TIMES-mallilla	Toimeksiantaja(t) Kauppa- ja teollisuusministeriö	
Avainsanat energy system, greenhouse gas, EU, Finland	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374	



Series title, number and  
report code of publication

VTT Working Papers 96  
VTT-WORK-96

<b>Author(s)</b> Ekholm, Tommi, Lehtilä, Antti & Savolainen, Ilkka		
<b>Title</b> <b>Unilateral emission reductions of the EU and multilateral emission reductions of the developed countries</b> <b>Assessing the impact on Finland with TIMES model</b>		
<b>Abstract</b> <p>This report assesses the impact of the unilateral greenhouse gas emission reductions proposed by the EU on the structure of European and Finnish energy systems with TIMES models. The two models used are techno-economical energy system models including an extensive description of technologies on energy production and consumption. The models derive the sectoral energy demand from given economic projections and calculate the optimal way of satisfying the energy demand through market equilibrium.</p> <p>The basis for EU wide calculations was the Common POLES-IMAGE economic scenarios which project a GDP growth of 2.4 % p.a. until 2020. A sensitivity analysis was conducted with a lower economic growth projection. The results indicated that a reduction of 20 % compared to 1990 emission levels by 2020 would lead to most reductions being conducted at the electricity sector. The consumption of coal in electricity generation would decrease considerably. In the long term some of the natural gas based production would incorporate carbon capture and storage (CCS), and the use of wind power would grow substantially. The value of carbon would lie at levels around 20 to 30 €/t CO<sub>2</sub> by 2020 were the reductions carried out without flexibility mechanisms. With a reduction target of -30 % by 2050, the value of carbon would rise to 40 – 50 €/t CO<sub>2</sub> by 2050, and nearly to 100 €/t CO<sub>2</sub> with a target of -60 % in 2050.</p> <p>The calculations on Finland were based on economic projections by the Ministry of Finance and the Government Institute of Economic Research. The scenarios assess the optimal way of reducing Finnish emissions with a range of prices for emission rights between 20 and 50 €/t CO<sub>2</sub>. The sectors not included in the emission trading scheme were assumed to conduct reductions with costs up to the value of emission rights. The use of coal was reduced after 2010, accompanied by an increase in the use of natural gas. The utilization of bioenergy increases considerable in the total energy balances. Also the use of wind power would grow. CCS would be profitable after 2020 with the higher prices for emission rights. The relative differences in sectoral emission are highest in electricity production.</p> <p>Were the Finnish reduction target at -20 % in 2020, Finland would buy emission rights with all price levels. A target of -10 % would result with selling of rights on higher price levels at later stages. The research also assessed the direct costs of the reduction measures, including costs from investment, operation, fuels and raw materials and trade.</p>		
<b>ISBN</b> 978-951-38-7156-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
<b>Series title and ISSN</b> VTT Working Paper 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		<b>Project number</b> 15904
<b>Date</b> March 2008	<b>Language</b> Finnish, Engl. abstr.	<b>Pages</b> 57 p.
<b>Name of project</b> EU:n yksipuolinen päästöjen rajoittaminen ja kehittyneiden maiden yhteinen päästöjen rajoittaminen – vaikutukset Suomeen arvioituna TIMES-mallilla	<b>Commissioned by</b> Ministry of Trade and Industry	
<b>Keywords</b> energy system, greenhouse gas, EU, Finland	<b>Publisher</b> 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	

# Alkusanat

Euroopan unioni on ehdottanut ilmastonmuutoksen vaikutusten rajoittamiseksi tavoitetta rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. Käytännöllisenä tavoitteena EU on ehdottanut teollisuusmaiden yhteistä voimakasta päästöjen rajoittamista, ja EU on sitoutunut rajoittamaan päästöjään 20 % vuoteen 2020 mennessä.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan EU:n ehdottamaa päästöjen rajoittamista TIMES-malleilla koskien sekä EU-tasoa että Suomea.

Tutkimus on tehty VTT:llä kauppaja teollisuusministeriön (KTM) tilauksesta. KTM kuuluu nykyisin työ ja elinkeinoministeriöön. KTM:n yhteyshenkilönä on ollut ylitarastaja Erja Fagerlund ja VTT:n tutkimusprofessori Ilkka Savolainen. Mallilaskelmat ovat suorittaneet erikoistutkija Antti Lehtilä ja tutkija Tommi Ekholm.

Ilkka Savolainen

# Sisällysluettelo

Alkusanat.....	5
1. Johdanto .....	7
2. TIMES-laskentamalli.....	9
3. EU:ta koskevat tarkastelut .....	12
3.1 Tarkasteluiden määrittäminen.....	12
3.2 Lähtöoletukset teknologioiden kehityksestä sekä potentiaaleista .....	12
3.3 Päästöt ja energiapalveluiden tuotanto .....	14
3.4 Hinta- ja markkinavaikutukset .....	17
3.5 Kehittyneiden maiden ja EU:n 60 %:n päästövähennysskenaariot .....	23
4. Suomea koskevat tarkastelut.....	25
4.1 Tarkastelujen lähtökohdat .....	25
4.2 Energian kokonaiskulutus .....	29
4.3 Sähkön hankinta ja kulutus.....	33
4.4 Energian loppukäyttö.....	36
4.4.1 Teollisuus .....	36
4.4.2 Rakennusten lämmitys .....	37
4.4.3 Liikenne.....	39
4.5 Kasvihuonekaasupäästöt.....	41
4.5.1 Kasvihuonekaasujen päästötase .....	41
4.5.2 Päästöjen kehitys eri sektoreilla .....	43
4.5.3 Päästökaupan tase.....	46
4.6 Päästöjen vähentämisen suorat kustannukset .....	49
5. Yhteenveto .....	52
Lähdeluettelo .....	56

# 1. Johdanto

Euroopan unioni on ehdottanut ilmastonmuutoksen vaikutusten rajoittamiseksi tavoitetta rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. Käytännön toteutuksena EU on ehdottanut teollisuusmaiden yhteistä päästöjen rajoittamista 30 prosentilla vuoteen 2020 mennessä, tai vaihtoehtona on ollut esillä EU:n yksipuolinen päästöjen rajoittaminen 20 prosentilla.

VTT:llä on käytössä energiajärjestelmän ja myös kaikki muut Kioton pöytäkirjan päästösektorit ja kasvihuonekaasut kattavia laskentamalleja, joilla voidaan arvioida päästörajoitusten teknologisia vaatimuksia ja suoria kustannuksia päästörajoitustoimista. Näitä malleja ovat Suomen kattava TIMES ja maailman kattava Global TIMES (Loulou et al. 2005). Molemmat mallit perustuvat IEA:n ETSAP-yhteistyöhön ja toisaalta laajaan VTT:llä tehtyyn mallin tietokannan arviointiin ja kehittämiseen.

TIMES-mallilla on tehty aiemmin lukuisia Suomea koskevia tarkasteluja (mm. Forsström ja Lehtilä 2005). Global TIMES on otettu käyttöön vuonna 2006 ja ensimmäisiä tuloksia on julkaistu GHGT-8-konferenssiartikkelissa (Koljonen et al. 2006).

Vain osaa maailman maista koskevilla päästörajoituspöytäkirjoilla on useita haittapuolia. Esimerkiksi Kioton pöytäkirjan vahvistaneet maat kattavat vain noin 25 prosenttia maailman nykyisistä kasvihuonekaasujen päästöistä (IEA 2005a), ja toisaalta myös päästörajoitusten suhteellinen tiukkuus Kioton pöytäkirjan vahvistaneiden maiden joukossa on mitä ilmeisimmin erilainen.

Maat voivat myös varata päästökiintiöstään erilaisen osuuden energiaintensiiviselle teollisuudelle, joka on altteinta rajoittuneiden tai yksipuolisten päästönvähennyspöytäkirjojen haittavaikutuksille. Vaarana on, että sellainen energiaintensiivinen teollisuus, jonka tuotteiden hinnat määräytyvät maailmanmarkkinoilla, menettää kilpailukykyään. Näin voi käydä, jos maakohtaista tai suppeaa maaryhmää koskevista kasvihuonekaasujen päästörajoituksista tulee kustannuksia, joita ei ole kaikilla toimijoilla. Tällaisia aloja Suomessa ovat mm. teräksen, paperin ja sementin valmistus. Maailmalla vastaavanlainen ala on mm. alumiinin valmistus.

Suomella ja muilla vanhoilla EU:n jäsenmailla on kokemuksia aikaisemmasta taakanjaosta, jossa hyödynnettiin analyyttisenä työkaluna ns. triptyykkimenetelmää. Taakanjaosta sovittiin viime kädessä poliittisissa neuvotteluissa. VTT arvioi tuolloin triptyykkimallin sopivuutta päästöjen rajoittamistaan jakoon suomalaisten neuvottelijoiden tueksi. VTT toimitti keväällä 1998 työmuistioita neuvottelijoille eri vaihtoehdoista kuvata Suomen kannalta perustellummin ja sopivammin päästöjen rajoittamisen mallia (Savolainen et al. 1998).

Sittemmin ovat toimintaympäristö ja tietopohja merkittävästi muuttuneet lähinnä EU:n päästökaupan ja myös sähkömarkkinoiden integroitumisen myötä. Kioton kaudelle tehdyn maakohtaisen taakanjaon sijasta olisi EU:n sisäiselle velvoitekaudelle periaatteessa mahdollista irrottaa erillisiä kuplia, kuten EU:n päästökauppasektori tai pohjoismainen sähkömarkkina-alue. Päästökauppasektori voi myös laajentua koskemaan kokonaan uusia sektoreita, kuten liikennettä. Maakohtaisesta taakanjaosta voisi myös olla mahdollista luopua kokonaan jyvittämällä päästöoikeudet suoraan eri sektoreille tai aktiviteeteille.

VTT:llä on laadittu tutkimuksia kasvihuonepäästöjen rajoittamisen taakanjaosta mm. koskien ns. triptyykkimallia ja teollisuussektoreita (Soimakallio et al. 2004, Savolainen et al. 1998). Tämä hanke-esitys on jatkoa vuonna 2005 valmistuneelle KTM:lle tehdyille selvitykselle.

Työssä arvioidaan laskentamallien ja aiemmin tehtyjen tarkastelujen avulla teollisuusmaita ja EU:ta koskevien tiukkojen päästörajoitusvaatimusten merkitystä Suomelle, erityisesti päästörajoituksen teknisiä ratkaisuja ja kustannuksia sekä päästökaupan hintatasoa ja energiaintensiivisen vientiteollisuuden asemaa.

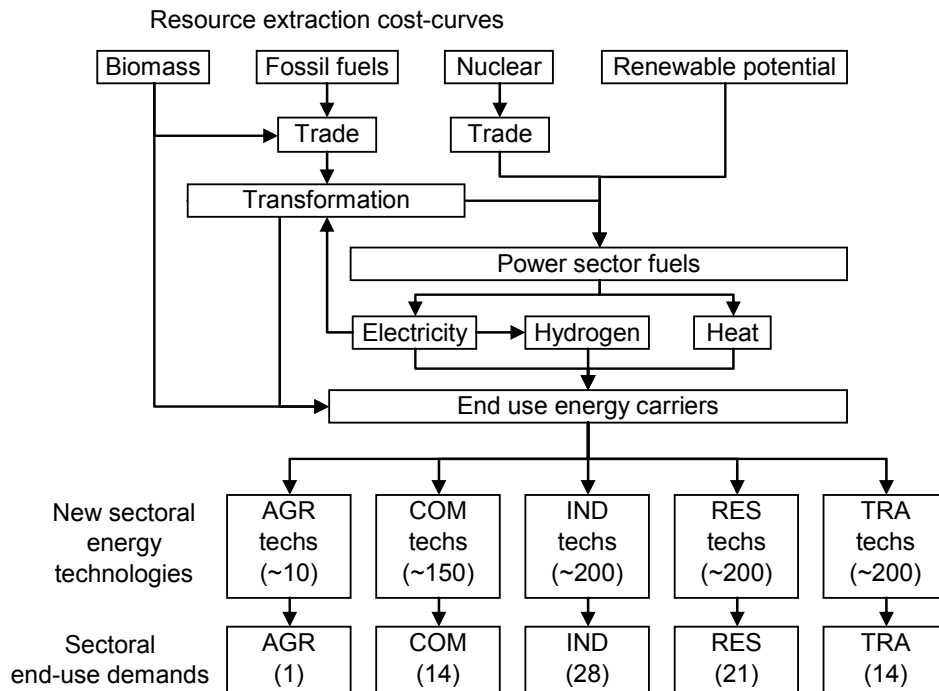


## 2. TIMES-laskentamalli

Tutkimus tehtiin käyttäen kahta TIMES-energiajärjestelmämallia: kansainvälisesti kehitettyä ja käytössä olevaa globaalia ETSAP-TIAM-mallia sekä VTT:llä kehitettyä Suomen TIMES-mallia. TIMES-mallit ovat teknistaloudellisia energiajärjestelmämalleja, jotka sisältävät laajan kuvauksen eri energiantuotannon ja loppukäytön teknologioista, resursseista ja energiajärjestelmän rakenteesta. Mallit arvioivat tulevaisuudessa toteutuvan energian kulutuksen eri käyttökohteissa käyttäen mallin lähtötietoina annettavaa talousskenaariota, joka sisältää mm. projektiot BKT:n, väkiluvun ja eri teollisuudenalojen kehityksestä, ja laskevat markkinatasapainon avulla kustannusoptimaalisen tavan tyydyttää energian kysyntä halutuissa tulevaisuusskenaarioissa.

Globaali malli on jaettu erilaisiin maantieteellisiin alueisiin, jotka ovat toisiinsa kytkettyinä energiamuotojen kaupan kautta. Malli kattaa kaikki Kioton pöytäkirjan kaasut ja päästösektorit, tässä sovelluksessa ei kuitenkaan huomioida LULUCF-sektorin päästöjä. Kullekin alueelle on rakennettu kuvaus alueen energiajärjestelmästä, joka ulottuu resurssien hankinnasta jalostus- ja muuntoprosessien kautta energian loppukäytön kohteisiin. Yksinkertaistettu esimerkki energiajärjestelmän rakenteesta TIMES-mallissa on esitetty kuvassa 1. Energiateknologiat on kuvattu pääasiassa niiden hyötysuhteiden, käyttökertoimien, eliniän, tuotannon vaihtelun, investointi-, käyttö-, huolto- ja poistokustannusten sekä päästöjen perusteella. Näille teknologiaparametreille on arvioitu nykyarvot eri alueilla sekä projektiot niiden kehittymisestä tulevaisuudessa. Resurssien hankinnalle on usein määritelty portaittainen kustannuskäyrä, joka kuvaa esimerkiksi konventionaalisten, vaikeasti hyödynnettävien ja epäkonventionaalisten uraanivarojen louhimiskustannuksia. Eri prosessien teknologiakuvausten lisäksi malliin on osalle teknologioista määritelty myös erilaisia rajoitteita, esimerkiksi uuden teknologian markkinapenetraatiolle tai tekniselle potentiaalille tietyssä käyttökohteessa.

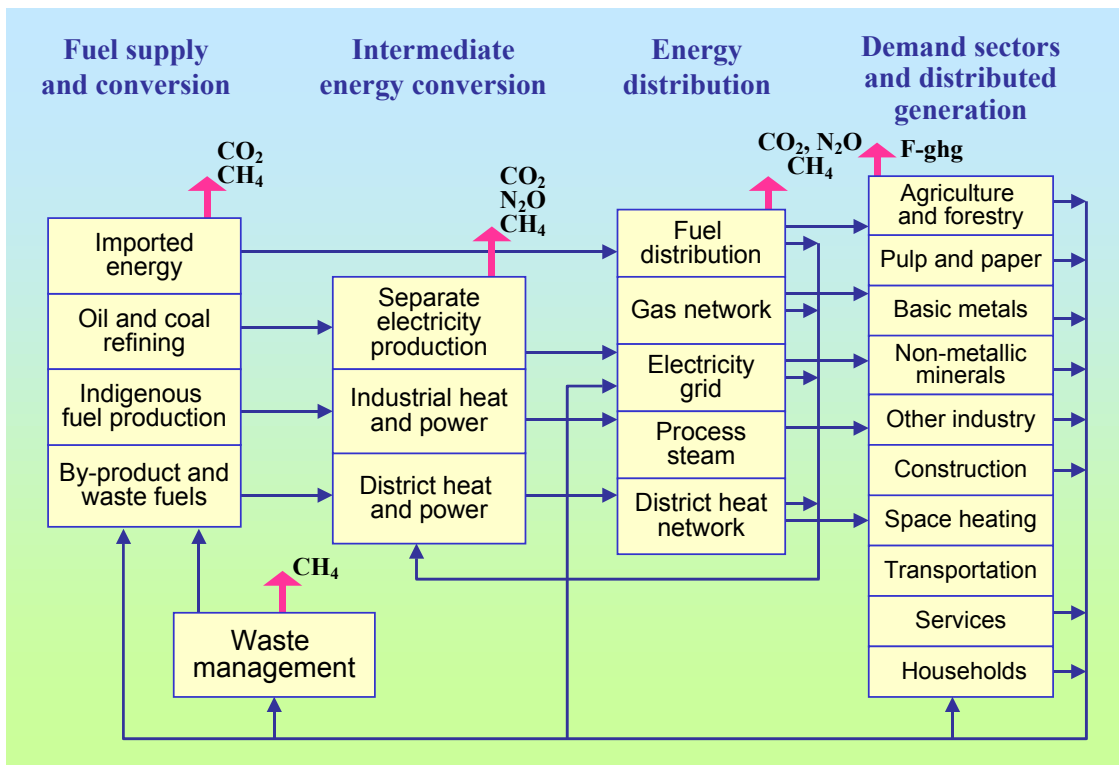
Mallissa oletetaan tehokkaat markkinat ja täydellinen ennakkointikyky tulevaisuuteen, jotka ohjaavat energiajärjestelmän globaaliin kustannusoptimiin, ottaen huomioon investointi-, hyödyke-, käyttö- ja huoltokustannukset, sekä mahdollisen energiapalveluiden kysynnän menetyksen arvo. Malli ei sisällä teollisuustuotteiden kauppaa, minkä vuoksi tulokset jättävät huomiotta ns. ”hiilivuodon” mahdollisuuden, jolloin kohonneiden kustannusten vuoksi tuotantoa siirtyisi alueille, joissa päästöjä ei ole rajoitettu. Skenaarioita muodostettaessa muodostetaan aina ensin ns. Baseline-skenaario, joka toimii referenssinä tämän jälkeen muodostettaville politiikkaskenaarioille, tässä tapauksessa EU:n päästörajoitusskenaarioille. Politiikkaskenaarioille lasketaan markkinatasapainotilanne Baseline-skenaariota tasapainotilanteen avulla arvioimalla energiapalveluiden kysynnän muutokset hinnan muutosten ja kysynnälle määritellyn hintajoukon avulla.



Kuva 1. Yksinkertaistettu esimerkki energiajärjestelmän rakenteesta globaalissa TIMES-mallissa. Suluissa olevat luvut kuvaavat teknologisten vaihtoehtojen tai käyttökohteiden määrää mallissa.

Pelkästään Suomea koskeissa tarkasteluissa käytetty Suomen TIMES-malli on metodologialtaan varsin samanlainen kuin globaali TIMES-malli. Suomen TIMES-mallin perusrakennetta on havainnollistettu kuvassa 2.

Suomen TIMES-malli eroaa globaalista TIMES-mallista erityisesti siinä, että mallin rakenteessa on otettu huomioon monia Suomen energiajärjestelmämallin erityispiirteitä, kuten metsäteollisuuden keskeinen merkitys, erilaiset jäte- ja sivutuotepolttoaineet sekä laaja sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Yhden alueen mallin käyttö eroaa globaalista mallista myös siinä, että tuontienergian hinnat joudutaan kuvaamaan eksogeenisin skenaario-oletuksin. Myös mahdollisen päästökaupan hintatason kehitys joudutaan olettaamaan skenaarioittain. Päästökaupan vaikutus sähkön hintaan voidaan kuvata mallissa arvioimalla keskimääräisen marginaalisen sähköntuotannon päästöt, joista voidaan johdattaa päästöoikeuksien ja sähkön hinnan välinen vaikutuskerroin, tarvittaessa ajan funktiona. Suomen mallissa tämä kerroin perustuu VTT:n sähkömarkkinamallin tuottamiin tuloksiin. Suomen TIMES-mallissa kukin tarkasteluvuosi on jaettu kymmeneen vuoden sisäiseen sähkön ja lämmön kuormitusvaihteluja kuvaavaan jaksoon, joiden avulla sähkön ja lämmön tuotantoa optimoidaan ja marginaalikustannukset muodostuvat. Globaalissa mallissa vastaavia kuormitusjaksoja on vain kuusi. Suomen mallissa ei tässä työssä käytetty kysynnän hintajoustoja, sillä niitä koskevien arvioiden katsottiin olevan tarkastelun kannalta liian epävarmalla pohjalla.



Kuva 2. Suomen TIMES-mallin yksinkertaistettu rakennekaavio.

## 3. EU:ta koskevat tarkastelut

### 3.1 Tarkasteluiden määrittäminen

EU:ta koskevat tarkastelut tehtiin globaalilla ETSAP-TIAM TIMES-mallilla, johon on tehty lisäyksiä sekä päivityksiä VTT:llä, mm. uusia sähköntuotantoteknologioita koskien. Mallissa maailma on jaettu 15 maantieteelliseen alueeseen, joista Eurooppaa kuvaa kaksi, kokonaisuudessaan 31 maata sisältävää, aluetta. Tarkastelua varten laadittiin baseline-skenaario, jossa päästöjä ei vähennetä, sekä päästörajoitusskenaarioita.

EU:n alueelle määritettiin yksipuoleinen päästörajoitus, joka laskee EU:n alueen päästöt 20 % vuoden 1990 päästötasosta vuoteen 2020 mennessä, sekä 30 % vuoteen 2050 mennessä. Ajanjaksolle ennen vuotta 2020 sovellettiin EU:n Kioton pöytäkirjan mukaisia tavoitteita. Alhainen 30 %:n vähennystavoite vuodelle 2050 otettiin käyttöön sillä perusteella, että skenaarioissa oletettiin EU:n yksipuoliset päästövähennykset, jolloin suurimmat vähennystavoitteet voisivat olla poliittisesti epärealistisia. Muiden alueiden kehitys noudattaa rajoitusskenaariossa lähes täysin baseline-skenaariota. EU:n alueelle oletettiin täydellinen päästökauppa, mutta ei CDM- tai JI-hankkeita muiden alueiden kanssa. Päästörajoite muodostaa mallin marginaaliarvohinnoittelun kautta kaikille päästöjä aiheuttaville prosesseille päästömäärää kohti määräytyvän lisäkustannuksen, joka luonnollisesti muuttaa markkinatasapainotilannetta.

Päästörajoitusten vaikutuksia arvioitiin kahdessa erilaisessa talousskenaariossa, jotka sisältävät erilaiset oletukset talouden kehittymiselle, teollisuusaloittaiselle kasvulle sekä siten myös energian kysynnälle. Tarkastelut keskittyvät pääasiassa ns. Common POLES-IMAGE -skenaarioon (CPI), joka olettaa kohtuullisen talous- ja väkiluvun kasvun maailmanlaajuisesti tulevaisuudessa. Skenaariossa arvioidaan EU:n BKT:n kasvavan keskimäärin vuodessa noin 2,4 % vuoteen 2020 asti, ja esimerkiksi raskaan perusteollisuuden volyymin noin 1,8 % vuodessa. Baseline- ja rajoitusskenaarioihin viitataan mm. kuvateksteissä määreillä Base ja Lim. Tutkimuksessa vertailuna käytettävä GEM-E3-mallilla laskettu talousskenaario olettaa puolestaan vähäisemmän kasvun, BKT:lle vuodessa noin 1,4 % ja perusteollisuudelle 0,8 % vuoteen 2020 asti.

### 3.2 Lähtöoletukset teknologioiden kehityksestä sekä potentiaaleista

Kaikissa laadituissa skenaarioissa käytettiin samoja projektioita teknologian kehitykselle ja resursseille. VTT:llä on päivitetty VTT:n asiantuntija-arvioiden pohjalta alkuperäisiä TIAM-mallin teknologiaprojektioita etenkin teollisuuden CHP:n, hiilen, maakaasun ja biomassan käytön sähköntuotannossa, 4. sukupolven ydinvoimaloiden sekä tuulivoimaloiden osalta.

Tuulivoiman mallinnus perustuu SETELI-hankkeessa (Suomalaisen energiateknologian kansainvälinen kysyntä ja liiketoimintamahdollisuudet ilmastopolitiikan kehittyessä) VTT:n tuulivoima-asiantuntijoiden tekemiin arvioihin. Tuulivoima on jaoteltu sekä onshore- että offshore-voimaloiden osalta viiteen luokkaan perustuen alueellisiin arvioihin tuuliolosuhteista. Luokkien parametriarvoja vuodelle 2020 on esitetty taulukossa 1. Potentiaaliarvioiden pohjana on käytetty tanskalaisen Risø-tutkimuskeskuksen tuuliatlaksia, U.S. Department of Energyn NREL -tutkimuslaitoksen. sekä Stanfordin yliopiston Global wind potential -arvioita, joita on yhdenmukaistettu ja muokattu alkuperäisiä arvioita konservatiivisimmiksi sekä lisätty rajoitteita maankäytölle. Kokonaiskapasiteetti arvioitiin maantieteelliseltä pohjalta siten, että vain tuulisia alueita käytetään, ja 5 % näiden alueiden pinta-alasta voidaan hyödyntää maksimissaan 7 MW/km<sup>2</sup> tuulivoimalatiheydellä. Lisäksi tuulivoiman ei sallittu ylittää 35 %:n osuutta sähkön kokonaistuotannosta minään vuorokauden- tai vuodenaikana. Kustannusarviot on muodostettu IEA R&D Wind -hankkeen sekä alan markkinakatsauksiin perustuvista oppimiskäyrämallista. Käytetyt arviot tuulivoiman kehitykselle ovat IEA:n lähitulevaisuuden arvioihin (IEA 2005b) verrattuna 5–25 % pienemmät kustannusten osalta ja samansuuruiset tuulivoiman käyttökertoimien osalta.

*Taulukko 1. Tuulivoimateknologioiden parametriarvoja luokittain vuodelle 2020.*

	Käyttöönotto	Inv.kust. [€/kW <sub>e</sub> ]	Kiinteät käyttökust. [€/kW <sub>e</sub> ]	Käyttökerroin	Maks.kapasiteetti EU:ssa [GW]
Onshore 1	2005	745	19	38 %	29
Onshore 2	2005	745	19	34 %	37
Onshore 3	2010	745	19	31 %	36
Onshore 4	2020	745	19	26 %	53
Onshore 5 <sup>1</sup>	2030	646	31	28 %	63
Nearshore 1	2005	901	36	39 %	26
Nearshore 2	2010	901	36	32 %	16
Offshore 1	2005	1048	58	41 %	52
Offshore 2	2010	1048	58	39 %	71
Offshore 3	2020	1048	58	35 %	63

Ydinvoimaloiden kehitystä sekä kustannuksia arvioitiin mm. IEA:n (IEA 2005b), IAEA:n (Rogner ja McDonald 2004) arvioiden sekä tieteellisiä julkaisuiden (Koster et al. 2003, Wallace et al. 2006) perusteella. Tulevista ydinvoimalatyypeistä malliin sisällytettiin 3. ja 4. sukupolven kevytvesireaktorit, sekä vuodesta 2020 alkaen, vielä prototyyppiasteella oleva ns. PBMR-reaktori (Pebble-Bed Modular Reactor). Hyötöreaktoreita ei malliin sisällytetty niiden spekulatiivisen luonteen vuoksi.

---

<sup>1</sup> Onshore 5 -luokka vastaa hajautettua tuulivoimaa, jolle parametrit on annettu käyttöönottovuodelle 2030.

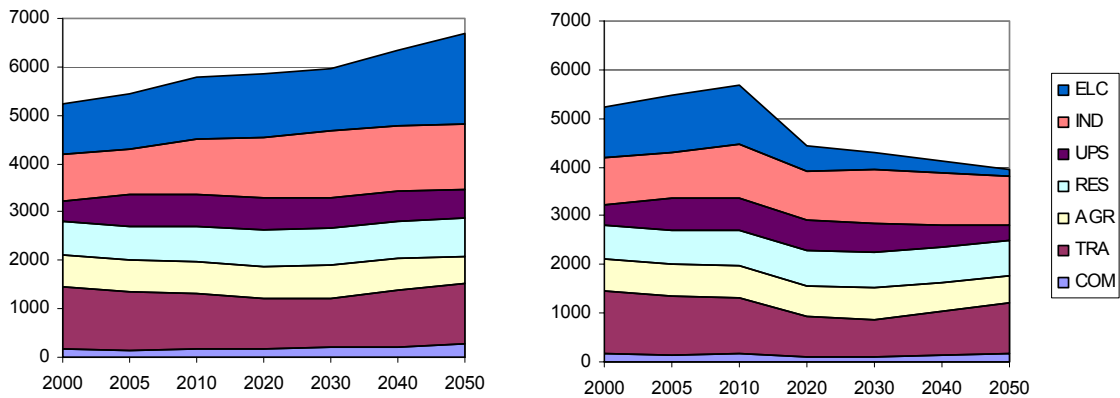
Hiilidioksidin talteenottoa on arvioitu usean lähteen (mm. IEA-ETP-projekti, EMF-22, US-EPA, IPCC) perusteella. Suurin potentiaalinen sidontakapasiteetti arvioidaan olevan hiilidioksidin varastoinnilla merenpohjaan, mutta tämä menetelmä sisältää myös erittäin suuria epävarmuuksia, minkä seurauksena menetelmän kustannukset arvioitiin erittäin suuriksi. Kustannuksiltaan käyttökelpoisemmalla tasolla arvioitiin olevan varastointi tyhjentyneisiin kaasu- tai öljykenttiin sekä kivihiiikerrostumiin, ja näiden kokonaiskapasiteetiksi Euroopassa arvioitiin noin 30 Gt hiiltä.

Resurssiarviot perustuivat tärkeimpiin kansainvälisiin lähteisiin. Uraanivarat arvioitiin OECD:n Nuclear Energy Agency:n ns. Red Book -julkaisun (OECD 2005) perusteella, ja oletettiin hieman maltillisempia arvioita epäkonventionaalisista uraanivaroista julkaisuun verrattuna. Bioenergiavarat arvioitiin FAO:n tietokantojen perusteella, ja tehdyt arviot ovat esimerkiksi IPCC:n arvioihin verrattuna kohtalaisesti alempia. Aiemmassa tutkimuksessa (Syri et al. 2007) tutkittiin mm. TIAM-mallin tulosten herkkyyttä tehdyille resurssiarvioille vähentämällä uraanin, vesivoiman, tuulivoiman tai hiilidioksidin sidontakapasiteetin potentiaaleja 20 %, tai energiakasvien potentiaalia 50 %.

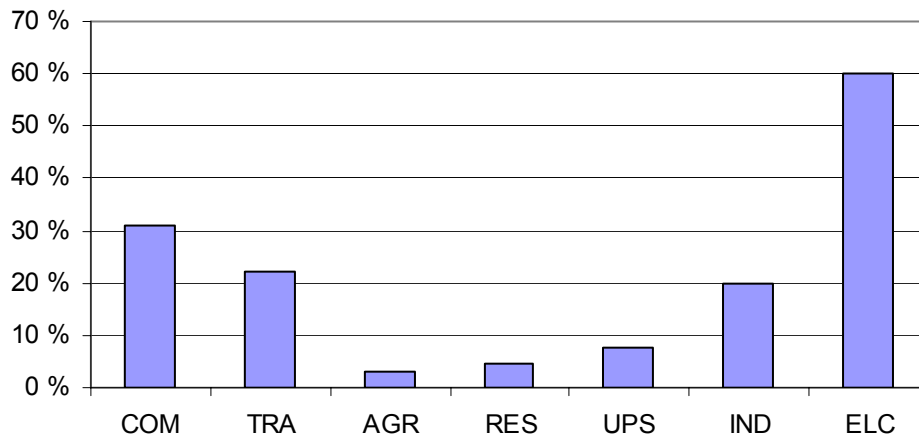
Herkkyystarkastelun tuloksena mallin todettiin olevan hyvin stabiili resurssiarvioiden muutoksien suhteen, ja tutkitun EU:n asettaman 2 °C:n lämpenemistavoitteen saavuttamiseksi tarvittavien päästövähennyksen kustannukset kasvoivat noin 2–5 %.

### **3.3 Päästöt ja energiapalveluiden tuotanto**

Kuvassa 3 esitetään Euroopan baseline- ja rajoitusskenaarion päästökehitykset seitsemälle päästösektorille jaettuna. Suurimmat päästövähennykset toteutettaisiin vähennysskenaariossa sähkösektorilla, kun taas baseline-skenaariossa sähkösektorin päästöt kasvaisivat eniten. Vähennysskenaarion tapauksessa sähköntuotannon päästöt kivihiihen poltosta vähenevät n. 80 % vuonna 2020 verrattuna baseline-skenaarioon, mikä johtaa n. 60 % vähenemään sähköntuotannon kokonaispäästöissä. Maakaasun käyttö pysyi lähes samana baseline-skenaarioon nähden. Teollisuuden päästöt kivihiihen poltosta vähenisivät vastaavasti n. 23 %, mikä johtuu samansuuruisesta vähenemästä hiilen käytössä. Kokonaisuudessaan teollisuuden päästöt vähenisivät noin 20 %. Liikennesektorilla molemmissa skenaarioissa päästöt ensin vähenevät polttoainetaloudellisempiin ja vähäpäästöisempiin teknologioihin siirtymisen takia, mutta kääntyvät uudelleen kasvuun kysynnän kasvun vuoksi. Muilla sektoreilla vähenemät ovat vähäisempiä, tosin näillä sektoreilla vähennyskeinojen mallintaminen on rajallista sekä kustannusarviot epävarmoja. Päästövähennykset baseline-skenaarion verrattuna ja sektoreittain eriteltyinä on esitetty kuvassa 4.



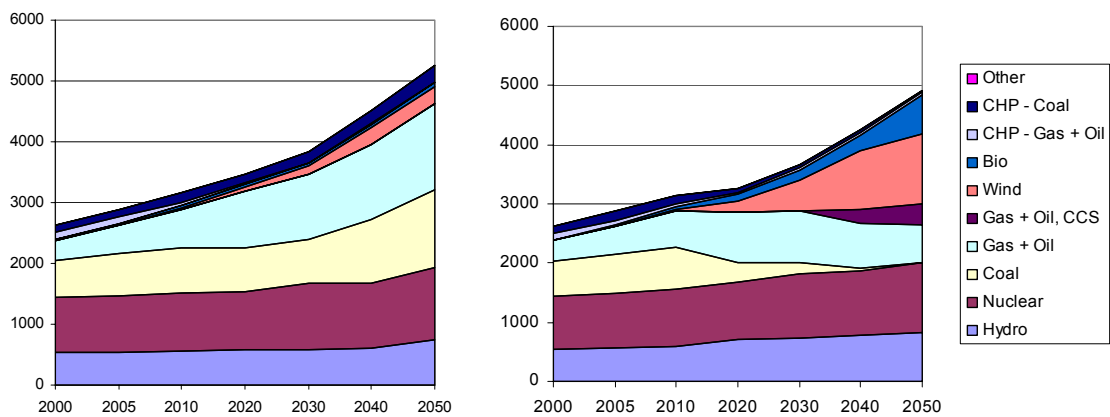
Kuva 3. EU:n päästöt [Mt-CO<sub>2</sub>-ekv] sektoreittain baseline- ja rajoitusskenaariossa. Kuvaajan sektorijako: AGR – maatalous, COM – kaupallinen, ELC – sähkötuotanto, IND – teollisuus, RES – asuminen, TRA – liikenne, UPS – polttoaineiden tuotanto ja jalostus.



Kuva 4. Sektorikohtaiset päästövähennykset sektoreittain EU:ssa vuonna 2020 baseline-skenaarioon verrattuna. Sähkösektorin (ELC) päästöt vähenevät eniten sekä suhteellisesti että absoluuttisesti. Liikennesektorin (TRA) päästöt kääntyvät vuoden 2030 jälkeen uudestaan nousuun, ja kaupallisen sektorin (COM) päästövähennysten absoluuttinen määrä on vähäinen.

Sähkösektorin päästövähennykset ovat seurausta 2010 alkavasta vähittäisestä siirtymisestä fossiilista polttoaineesta uusiutuviin energiamuotoihin, mikä voidaan havaita kuvasta 5. Rajoitusskenaariossa kivihiilen käyttö vähenee puoleen vuoteen 2020 mennessä ja lähes nollaan 2040 mennessä, kun olemassa olevaa hiilivoimalakapasiteettia ei uudisteta. Päästövähennysten seurauksena myös maakaasun käyttö kasvaa hitaammin sähköntuotannossa baseline-skenaarioon verrattuna.

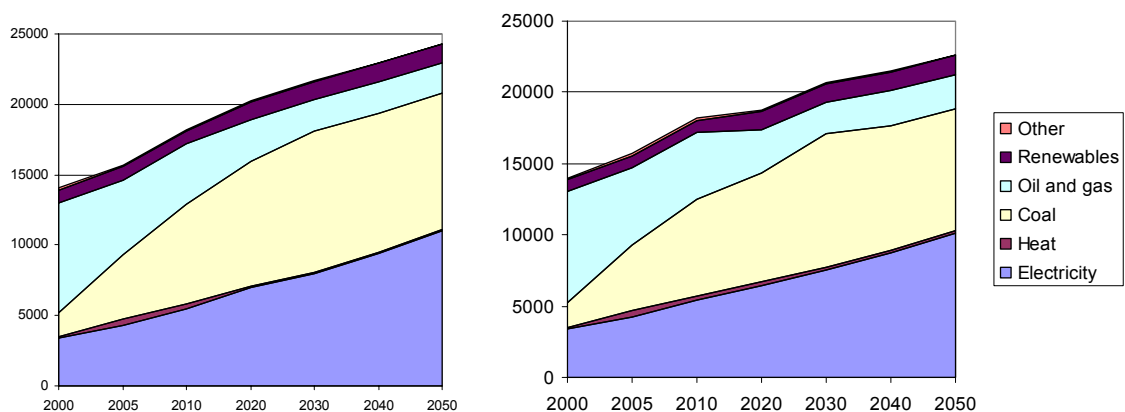
Kasvavaan sähkön kysyntään vastataan pääosin uudella tuulivoimakapasiteetilla sekä biomassan poltolla, josta lähes 70 % oli CHP-tuotannosta. Vuonna 2020 tuulivoima on lähinnä luokkien 1 ja 2 onshore-voimaloita, ja senhetkisestä onshore-potentiaalista hyödynnetään vain reilu kolmannes. Maakaasun osuus pysyy baseline-skenaarioon verrattuna lähes samana, ja maakaasun käytön yhteydessä otetaan käyttöön myös hiilidioksidin erotusmenetelmiä vuodesta 2030 alkaen. Kivihiilen käyttö vähenee voimakkaasti vuodesta 2010 alkaen, eikä kivihiileen perustuvassa lauhdevoimassa hyödynnetä CO<sub>2</sub>-erotusta kohtalaisen maltillisten pitkän aikavälin vähennystavoitteiden vuoksi. Ydinvoimalla tuotetun sähkön määrä kasvaa lähes samansuuruisesti molemmissa skenaarioissa, mutta osuus sähköntuotannosta laskee hieman. Rajoitteena ydinvoiman laajemmalle käytölle on helposti hyödynnettävien uraanivarojen väheneminen, mikä heijastuu vähitellen kasvavassa uraanin hinnassa, joka kaksinkertaistuu vuosina 2010–2050.



Kuva 5. Sähköntuotanto [TWh] teknologioittain EU:ssa baseline- ja rajoitusskenaariossa. Kivihiilivoimaloihin ei tehdä uusia investointeja, mutta vanha kapasiteetti käytetään loppuun. Kasvavaa sähkön kysyntää tyydytetään pääasiassa tuulivoimalla ja bioenergialla. Sähkön tuotanto vähenee noin 6 % baseline-skenaarioon nähden.

Teollisuuden energiankäyttö, joka on esitettyä kuvassa 6, muuttuu vähemmän baseline- ja rajoitusskenaarioiden välillä. Kivihiilen kulutus laskee skenaarioiden välillä n. 14 % vuonna 2020, ja vastaavasti sähkönkulutus väheni ja öljyn ja maakaasun käyttö kasvoi hieman. Toisin kuin sähköntuotannossa, kivihiilen osuus ei laske merkittävästi vähennysskenaariossa. Tämä johtuu osin kustannuseroista sähköntuotannon ja teollisuuden kivihiiltä käytävissä teknologioissa – mitä raportissa on arvioitu tarkemmin myöhempanä – ja osin vaihtoehtojen puutteesta esim. terästuotannossa. Energian kokonaiskulutus laskee n. 7 % pääasiassa energian kustannusten nousun aiheuttaman kysynnän laskun vuoksi.





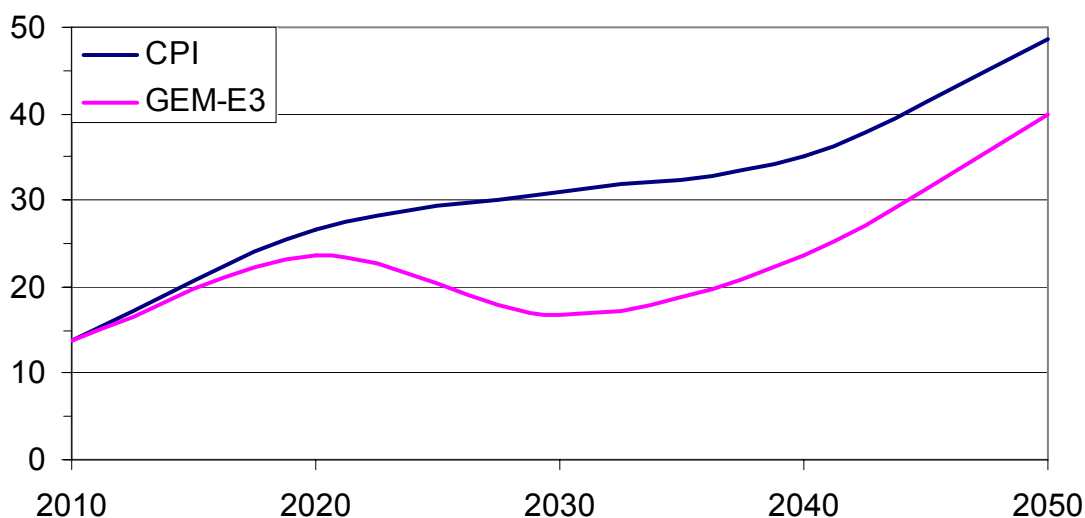
Kuva 6. Teollisuuden energiankäyttö [PJ] EU:ssa baseline- ja rajoitusskenaariossa. Kivihiilen käyttö teollisuudessa on rajoitusskenaariossa lähes sama kuin baseline-skenaariossa.

### 3.4 Hinta- ja markkinavaikutukset

Mallin päästörajoitteen määräämä päästöjen marginaalihinta vastaa reaalia maailman päästöoikeuden hintaa täydellisten markkinoiden vallitessa, ja marginaalihinnan kehitys esitetään kuvassa 7. Kuvassa esitetään hintakehitys kahdessa erilaisessa talousskenaariossa, joista pienemmän talouskasvun olettavassa GEM-E3-mallin tuloksena saadussa talousskenaariossa päästöoikeuden hinta on selkeästi pienempi johtuen pienemmästä energiankulutusprojektiosta. Molemmissa skenaarioissa mallin mukaiset päästöjen marginaalikustannukset vuonna 2010 ovat noin kolmanneksen alempia kuin esimerkiksi välillä 20–25 €/t kesäkuussa 2007 vaihdellut vuoden 2008 päästöoikeuksien forward-hinta<sup>2</sup>. Oletettu yksipuolinen päästörajoitus tiukkenee hitaasti vuoden 2020 jälkeen, minkä seurauksena päästöjen marginaalihinta kasvaa myös hitaasti, keskimäärin 2 % vuodessa vuoteen 2050 asti CPI-skenaariion tapauksessa.

On kuitenkin hyvä huomata, että malli olettaa täydellisen ennakointikyvyn ja mahdollisuuden toteuttaa päästövähennykset aina kustannustehokkaimmalla tavalla kaikilla sektoreilla. Mallin muodostama päästöjen marginaalihinta ei myöskään sisällä nykyisten päästöoikeuksien huomattavan suurta volatilitteettia. Toteutuva hiilidioksidipäästöjen hinta voi siten olla korkeampi kuin mallin antama arvio.

<sup>2</sup> Ks. esim Nord Pool, [www.nordpool.com](http://www.nordpool.com), tuote EUADEC-08.



Kuva 7. Päästöjen marginaalikustannus [€/t CO<sub>2</sub>-ekv] kahdessa eri talousskenaariossa. EU:n rajoitustavoitteen oletetaan tiukentuvan hitaasti vuoden 2020 jälkeen, minkä seurauksena päästöjen marginaalikustannus kasvaa maltillisesti, noin 2 % vuodessa. Alemman talouskasvun olettavassa GEM-E3:n talousskenaariossa marginaalikustannukset jäävät pienemmiksi pienemmän energian kysynnän vuoksi.

Eri malleilla tehdyt arviot vastaavista EU:n päästövähennyksistä ovat antaneet hieman suurempia arvioita marginaalikustannuksille vuonna 2020. Eri mallien toimintaperiaatteet sekä mallinnustarkkuus eroavat kuitenkin merkittävästi, ja ilman yksityiskohtaista tietoa tutkimusten oletuksista, mm. malliin sisältyvistä teknologiavaihtoehdoista sekä potentiaali- ja kustannusarvioista, mallien tulosten vertailu on huomattavan vaikeaa. Energiajärjestelmän kannalta tutkimuksessa käytetty TIMES-malli on kuitenkin selkeästi yksityiskohtaisempi vertailuissa tutkimuksissa käytettyihin malleihin nähden. Kuten kuvan 7 perusteella voidaan todeta, myös oletettu taustaskenaario vaikuttaa oleellisesti päästövähennyksekustannuksiin. Alla on tuloksia eri tutkimuksista.

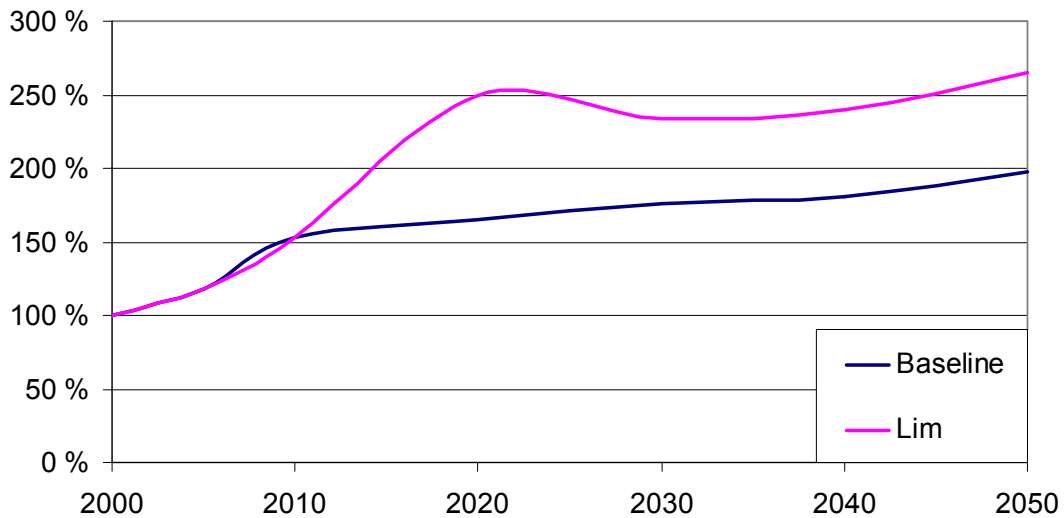
- Euroopan komissiolle tehty tutkimus GEM-E3-makrotalousmallilla 21 % päästövähennyksistä vuoteen 2020 mennessä: 44 €/t (EC 2007)
- Pohjoismaiselle ministerineuvostolle tehty tutkimus MARKAL- ja PRIMES-energiajärjestelmämalleilla 15 % päästövähennyksistä vuoteen 2020 mennessä: 30 €/t; 30 % päästövähennyksistä vuoteen 2020 mennessä: 60 €/t (Norden 2007)
- IPTS/JRC -tutkimuslaitoksen tutkimus POLES- ja GEM-E3-malleilla 20 % päästövähennyksistä vuoteen 2025 mennessä: 54 €/t (Russ et al. 2005)
- Belgian ympäristöministeriölle tehty tutkimus PRIMES-energiajärjestelmämallilla 15 % päästövähennyksistä vuoteen 2020 mennessä: 42 €/t; 25 % päästövähennyksillä vuoteen 2020 mennessä: 110 €/t (FPB 2006).

Tutkimuksessa muodostettiin myös skenaario, jossa EU sai ostaa rajattomasti päästöoikeuksia ilman transaktiokustannuksia CDM-projektien kautta muualta maailmasta energiantuotanto- ja teollisuussektoreilla. CDM-skenaariossa noin 70 % päästövähennyksistä toteutettaisiin EU:n alueen ulkopuolella, ja päästöjen marginaalihinta olisi noin 6–8 €/t. Tulokset ovat samansuuntaisia verrattuna IPTS-tutkimuslaitoksen skenaarioon, jossa 90 % päästövähennyksistä toteutettiin CDM-hankkeiden kautta päätyen marginaalihintaan 2 €/t, joka on huomattavasti pienempi kuin hinta 54 €/t skenaariossa, jossa ei sallita CDM-hankkeita (Russ et al. 2005).

Hinnan asettaminen päästöille vaikuttaa eniten kivihiilellä tuotetun energian hintaan, ja vuonna 2020 päästökustannukset muodostivat noin 60 % kivihiilen ja noin 25 % maakaasun käytön kustannuksista. Tästä kustannusten huomattavasta kasvusta huolimatta kivihiihi oli edelleen käyttökustannusten kannalta halvin energiamuoto. Tämä selittää osaltaan kivihiilen vähäistä korvaamista muilla energiamuodoilla teollisuudessa, jossa esimerkiksi prosessilämmön ja -höyryn tuottamiseen tarvittavan kapasiteetin investointikustannukset olivat samaa suuruusluokkaa kivihiihiltä tai maakaasua hyödyntävien teknologioiden välillä. Sen sijaan sähköntuotannossa edistyneempien NGCC-maakaasuvoimaloiden investointikustannukset tuotettuun sähkömäärään nähden ovat huomattavasti hiilivoimaloita pienemmät, minkä seurauksena maakaasuturbiinit muodostuivat hiilivoimaloita kustannustehokkaammaksi sähköntuotantomuodoksi. Investointeja uusiin hiilivoimaloihin ei tehty, mutta olemassa oleva hiilivoimakapasiteetti käytettiin loppuun.

Päästöjen aiheuttama hinta välittyy eri tavalla eri hyödykkeille. Sähköntuotannossa kohoava sähkön marginaalihinta tekee nopeasti mm. tuulivoimasta kilpailukykyistä, mikä nähtiin tuulivoimakapasiteetin voimakkaana kasvuna kuvassa 5. Vähäpäästöisempien teknologiavaihtoehtojen vuoksi sähkön hinta kasvaa rajoitus- ja baseline-skenaarion välillä noin 30 %, kun taas lähinnä polttoprosesseilla tuotettavan lämmön hinta kasvaa jopa 40 % skenaarioiden välillä.

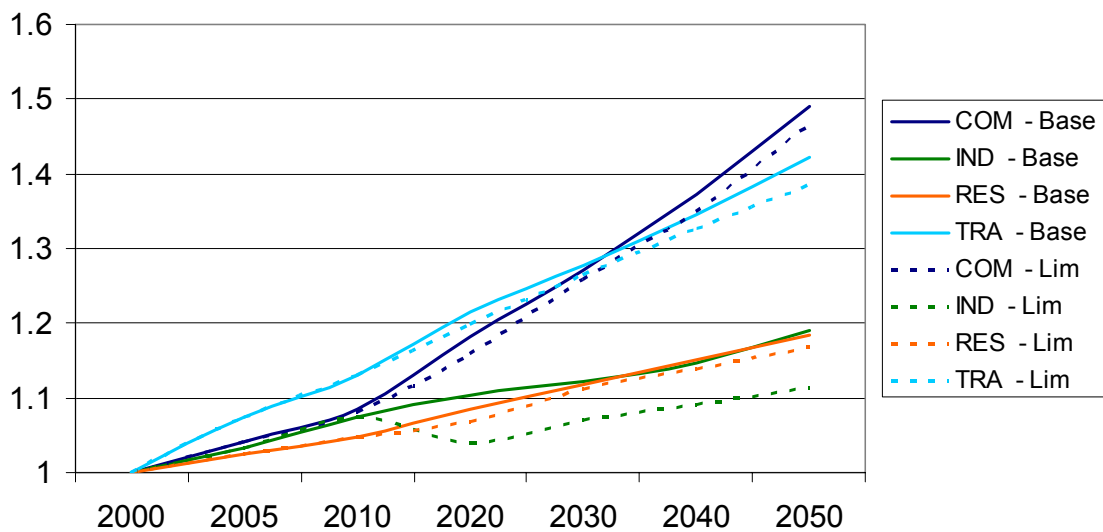
Mallin mukainen sähkön keskimääräisen hinnan kehitys EU:ssa on esitetty kuvassa 8. Kuvan tuloksia tulkitessa tulee ottaa huomioon mallin oletukset koko alueen sisällä toimivista täydellisistä yhtenäisistä sähkömarkkinoista, ja hintakehitys voi poiketa alueellisesti mm. paikallisten tuotantotekijöiden ja sähkön siirtokapasiteetin vuoksi. Hinta kohoaa eniten rajoituskauden alussa ja laskee hieman tämän jälkeen seurauksena uusista investoinneista tehokkaampaan tuotantokapasiteettiin.



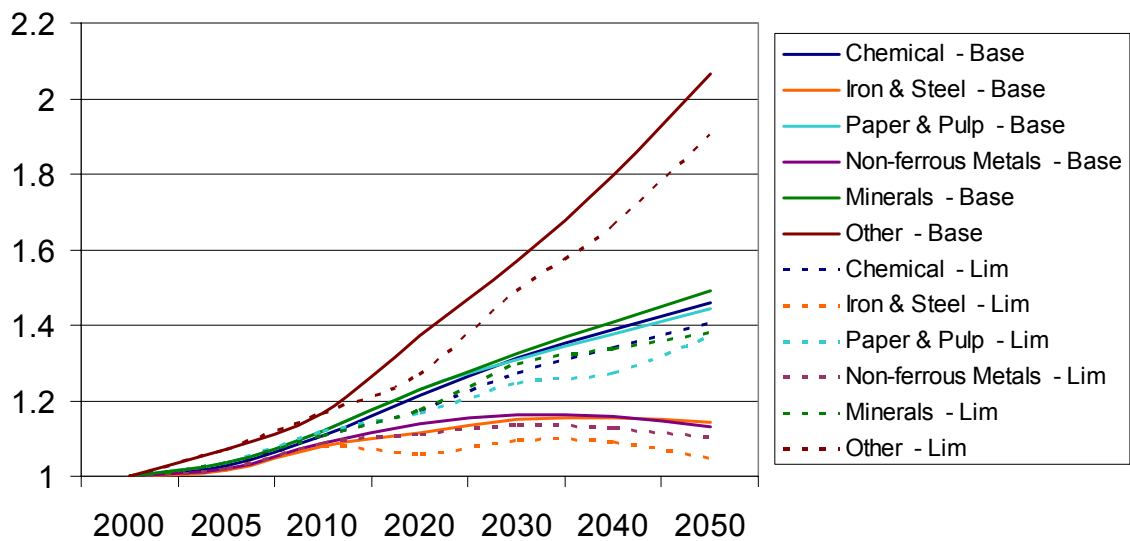
Kuva 8. Mallin tulosten mukainen keskimääräinen sähkön hinnan kehitys EU:ssa [indeksi, 2000 = 100 %]. Päästörajoitus nostaa keskimääräistä hintaa noin kolmanneksella baseline-skenaarioon nähden.

Päästörajoite nosti energian loppukäytön kustannuksia kaikilla sektoreilla keskimäärin 15 %. Teollisuuden energiankäytön kustannukset nousivat skenaarioiden välillä 26 % vuonna 2020, vaihdellen 10–40 % eri teollisuusaloilla. Vähäisintä hinnannousu oli kemianteollisuudessa ja värimetallien valmistuksessa pienemmän hiilen ja lämmön kulutuksen vuoksi. Näiden käytön kustannukset kohosivat eniten. Kustannustason nousua voitaisiin kuitenkin rajoittaa hiili-intensiivisillä teollisuudenaloilla siirtymällä vähemmän hiileen nojaaviin teknologioihin, esimerkiksi terästeollisuudessa DRI-rautaan ja valokaariuuneihin, mikä on huomioitu nykyisessä mallin versiossa vain rajoitetusti.

Kuvassa 9 esitetään neljän talouden sektorin energiapalveluiden loppukäytön kasvua baseline- ja rajoitusskenaariossa. Laskentamalli ei sisällä rakenteellisen muutoksen arvioita, vaan energiapalveluiden muutos arvioidaan energiapalveluiden kysynnän hintajouston avulla. Kokonaisuudessaan energiapalveluiden kulutus väheni 2–3 % eri ajanjaksoilla. Selkeästi suurin hintajouston mukainen kysynnän lasku tapahtuu teollisuudessa. Eri teollisuudenaloilla energiapalveluiden kysyntä muuttui päästörajoitteen seurauksena vaihtelevasti, kuten kuvasta 10 voidaan todeta. Vuonna 2020 kysyntä väheni skenaarioiden välillä värimetallien valmistuksessa ja kemianteollisuuden noin 3 %, teräksen, paperin ja mineraalien valmistuksessa noin 5 %, sekä muussa energiaintensiivisessä teollisuudessa noin 8 %.



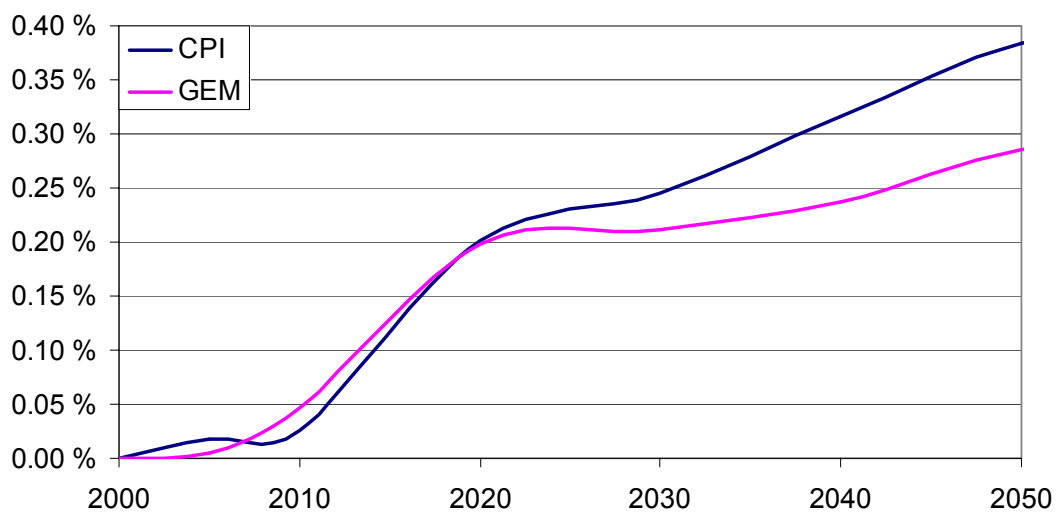
Kuva 9. EU:n neljän loppukäyttösektorin energiapalveluiden kysyntä [indeksi, 2000 = 1] baseline- ja vähennysskenaariossa. Kuvaajan sektorijako: COM – kaupallinen, IND – teollisuus, RES – asuminen, TRA – liikenne.



Kuva 10. EU:n teollisuuden energiapalveluiden kysyntä [indeksi, 2000 = 1] baseline- ja vähennysskenaariossa. Vuonna 2020 teollisuuden energiapalveluiden kysyntä pieneni keskimäärin 5 % päästörajoitusten vuoksi.

Päästövähennyksien nettokustannukset laskettiin baseline- ja vähennysskenaarioiden välisenä erotuksena koko energiajärjestelmän kokonaiskustannuksille, jolloin päästövähennykskustannukset sisältävät investointi-, käyttö- ja hyödykekustannusten muutokset skenaarioiden välillä, sekä myös kysynnän hintajoustosta syntyvän kysynnän menetyksen päästövähennysskenaariossa. Kuva 11 esittää päästövähennykskustannuksia suhteutettu-

na skenaarioissa käytettyihin EU:n BKT-projektioihin. Tutkimuksen perustapauksena käytetyssä CPI-talousskenaariossa kustannukset suhteessa BKT:hen ovat hieman suuremmat kuin pienemmän talouskasvuennusteen omaava GEM-E3-skenaario. Ero johtuu kalliimpien teknologiavaihtoehtojen käyttöönotosta suurempaa energiankysyntää tyydyttäessä saman päästörajoitteen vallitessa. Nettokustannukset muodostuvat kasvaneista investointi- ja käyttökustannuksista, joiden muutos skenaarioiden välillä on 0.15 % ja 0.14 % BKT:stä vuonna 2020; pienentyneistä fossiilisten polttoaineiden tuotanto ja tuontikustannuksista, -0.25 % BKT:stä; sekä kysynnän menetyksestä, 0.18 % BKT:stä, jolloin vuonna 2020 päästövähennysten kokonaisnettokustannus on noin 0.21 %.



*Kuva 11. EU:n päästövähennysten nettokustannukset suhteessa EU:n BKT:hen CPI- ja GEM-E3:n talousskenaarioissa. Energiajärjestelmän investointi- ja käyttökustannukset kasvoivat, ja fossiilisten polttoaineiden tuotanto- ja tuontikustannukset pienenivät, mikä lisäksi energian kysyntä pieneni kasvaneiden hintojen johdosta. Pienemmän talouskasvun olettavassa GEM-E3-skenaariossa kustannukset jäävät pitkällä aikavälillä pienemmiksi talouskasvuun nähden pienemmän energian kysynnän vuoksi. Lyhyellä aikavälillä suurempi talouskasvu kuitenkin kompensoi paremmin kustannusten nousua.*

Vertailu muihin tutkimuksiin paljastaa hajanaisen kirjjon arvioita kokonaiskustannuksista sekä vaikutuksista BKT:hen. Vaikkakin käytetyn TIMES-mallin mukaiset päästöjen marginaalikustannukset olivat muissa tutkimuksissa saatuja tuloksia pienemmät, sama ei päde systeemikustannuksissa kaikkien vertailututkimusten kohdalla. Esimerkiksi Pohjoismaille MARKAL-mallilla arvioidut 15 ja 30 %:n vähennystavoitteet tuottivat kustannukset 0,05 % ja 0,26 % BKT:stä (Norden 2007), ja POLES-mallilla tehty arvio EU:n 20 % vähennyksistä tuotti kustannukseksi 0,036 % BKT:stä (Russ et al. 2005). Kahdessa tutkimuksessa GEM-E3-mallilla arvioidut menetykset BKT:ssä olivat 1,4 % (EC 2007) ja 1,7 % (Russ et al. 2005) baseline-skenaarioon nähden, jotka vastaavat ar-

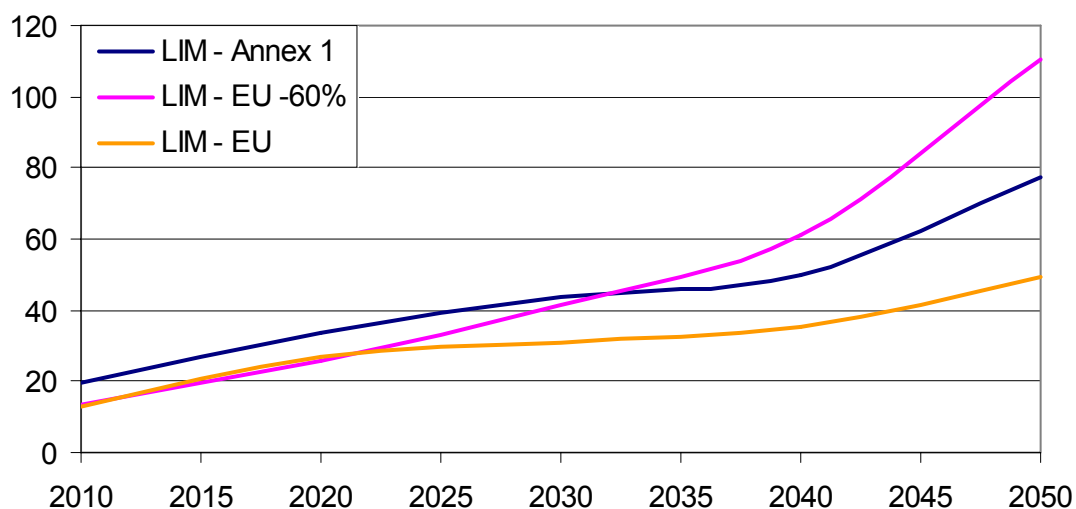
violta noin 0,07 prosenttiyksikköä vuotuisessa kasvussa BKT:n kasvun ollessa noin 2 % vuodessa. Vastaavaa arviota BKT:n muutoksesta ei TIMES-mallilla voitu muodostaa, sillä käytetty malli ei kuvaa koko talousjärjestelmää.

### **3.5 Kehittyneiden maiden ja EU:n 60 %:n päästövähennysskenaariot**

Tutkimuksessa laadittiin myös skenaariot, joista toisessa kaikki kehittyneet maat (Annex I) vähentävät päästöjään 20 % vuoteen 2020 ja 30 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna kunkin alueen vuoden 1990 päästötasoihin, ja toisessa EU:n päästövähennys tiukentuu 30 prosentista 60 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä. Annex I -skenaariossa alueiden välille oletettiin täydellinen päästökauppa ilman transaktiokustannuksia, CDM-projektien toteuttamista ei-Annex I -maissa ei sallittu.

Kuvassa 12 on esitetty päästövähennysten marginaalikustannusten kehitys kyseisissä skenaarioissa ja vertailuna kuvassa 7 esitetty EU:n yksipuolisen päästövähennysskenaariion marginaalikustannus vastaavassa CPI-talousskenaariossa. Kustannustaso on selkeästi suurempi kehittyneiden maiden kuin pelkän EU:n päästövähennyksissä pääasiassa USA:n ja Japanin korkeiden päästövähennyuskustannusten takia. Alueelliset erot päästövähennyuskustannuksissa syntyvät mm. USA:lle oletetusta suuremmasta väkiluvun talouden kasvuprojektista, joka johtaa suurempaan energian kysyntään, sekä Japanin pienemmistä uusiutuvan energian potentiaaleista ja korkeammasta kustannustasosta. Kustannuseron perusteella EU voisi Annex I -maiden päästörajoitteen tapauksessa olla jopa päästöoikeuksien nettomyyjä, ja mallilla tehdyn arvion perusteella Länsi-Eurooppa voisi myydä voitollisesti noin 5–15 % ja Itä-Eurooppa noin 25–30 % päästöoikeuksistaan. Vastaavanlainen kustannusero havaittiin myös POLES-mallilla laadituissa skenaarioissa, joissa toisessa Annex I -maat ja toisessa EU:n jäsenmaat rajoittavat päästönsä vuoden 2012 tasolle (Russ et al. 2005).

Jos EU:n yksipuolinen rajoitustavoite tiukkenee 60 prosenttiin vuonna 2050, nousee päästöjen rajoittamisen marginaalikustannus tasolle 100 €/t, mikäli päästöoikeuksia ei hankita EU:n ulkopuolelta.



Kuva 12. Päästöjen marginaalikustannus [€/t CO<sub>2</sub>-ekv] skenaariossa, jossa kaikki kehittyneet maat vähentävät vuonna 2020 päästöjään 20 % vuoden 1990 tasosta (LIM-Annex 1), sekä EU:n yksipuolisessa päästövähennysskenaarioissa (LIM-EU -60 % sekä LIM-EU). Skenaariossa LIM-EU -60 % oletetaan EU:n vuoden 2050 päästönrajoitustavoitteen tiukkenevan 30 prosentista 60 prosenttiin. Annex 1:n päästövähennysskenaariossa kustannustaso on selkeästi suurempi kuin pelkän EU:n päästövähennyksissä, johtuen pääasiassa USA:n ja Japanin korkeista päästövähennyuskustannuksista.

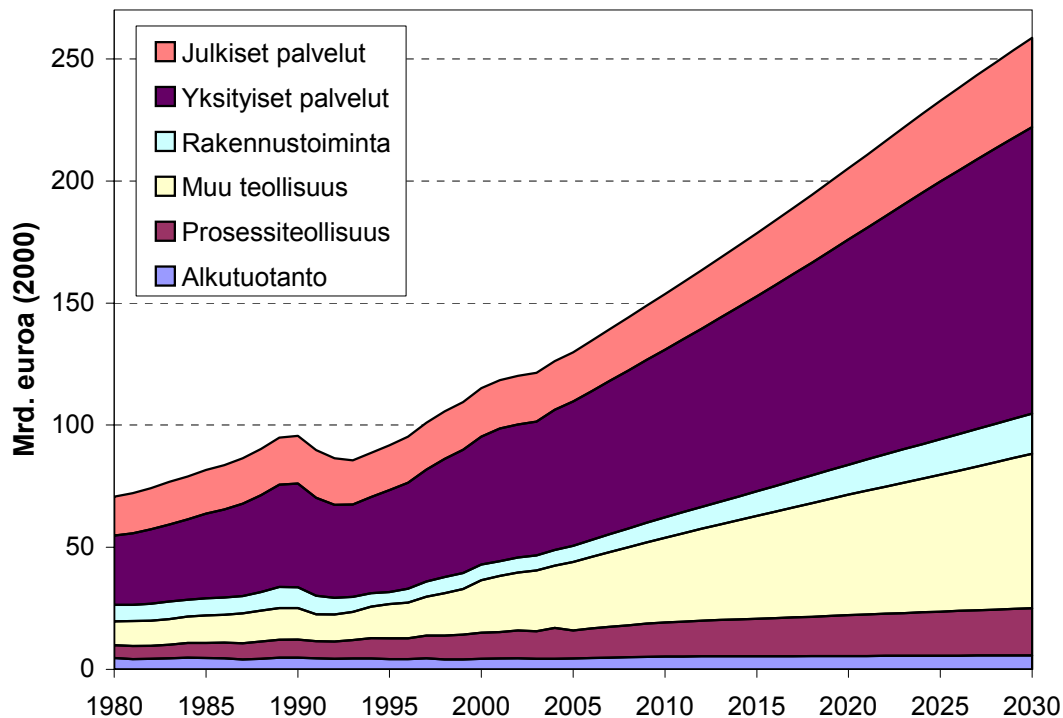


## 4. Suomea koskevat tarkastelut

### 4.1 Tarkastelujen lähtökohdat

Energiajärjestelmän kehityksen tärkeimpänä veturina toimii TIMES-järjestelmämallissa hyötyenergian kysyntä. Kysynnän kehitys puolestaan määräytyy mallissa suurelta osin bruttokansantuotteen sektorikohtaisista kehitysarvioista. Nämä arviot perustuvat kauppa- ja teollisuusministeriöltä (KTM) vuoden 2007 touko- ja heinäkuussa skenaariotyötä varten saatuihin yksityiskohtaisiin arvioihin. Päivitetty arvio talouskasvusta on hieman korkeampi kuin vuonna 2005 eduskunnalle annetun energia- ja ilmastostrategian pohjana ollut arvio. Kuvassa 13 on esitetty skenaarioissa oletettu talouskasvun kehitys päätoimialaryhmittäin.

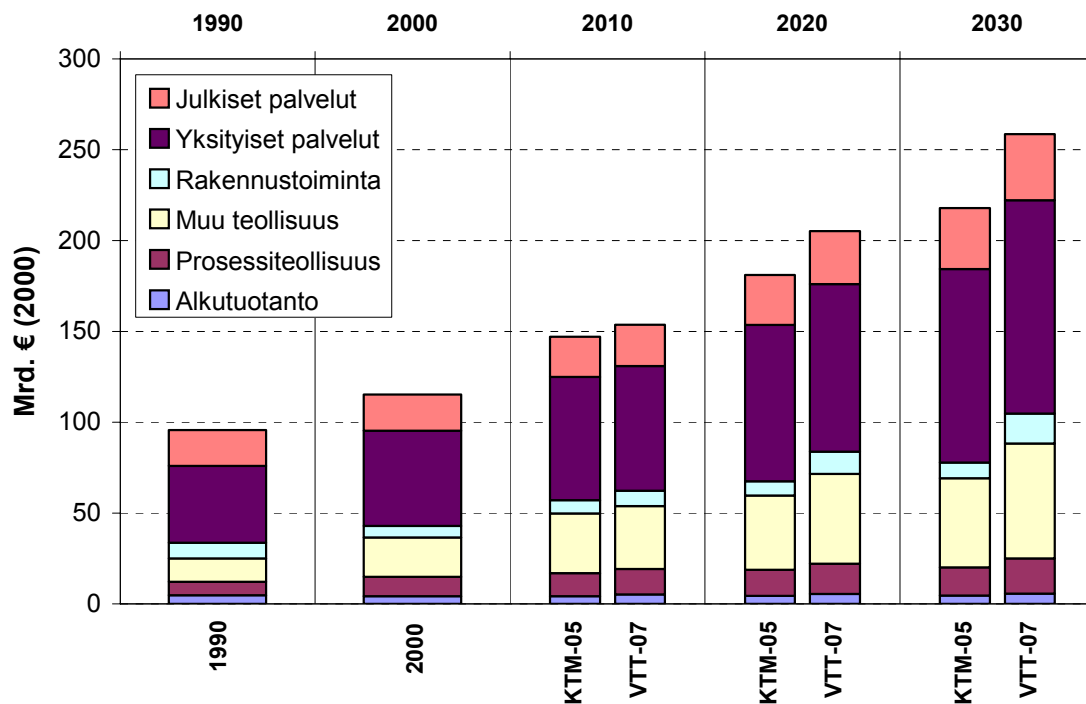
Energian käytön ja päästöjen kannalta keskeisillä sektoreilla talouden kehitysarviot on kuvattu mallissa yksityiskohtaisemmin. Esimerkiksi energiantensiivisen prosessiteollisuuden toimialoilla on arvioitu suoraan tärkeimpien tuotteiden tuotannon kehitys. Kuten talouskasvuoletukset, myös metsäteollisuuden ja metallien valmistuksen tuoteryhmittäiset kehitysarviot saatiin työtä varten kauppa- ja teollisuusministeriöltä. Kuvassa 14 verrataan kehitystä aiemmassa työssä (Forsström & Lehtilä 2005) käytettyyn arvioon.



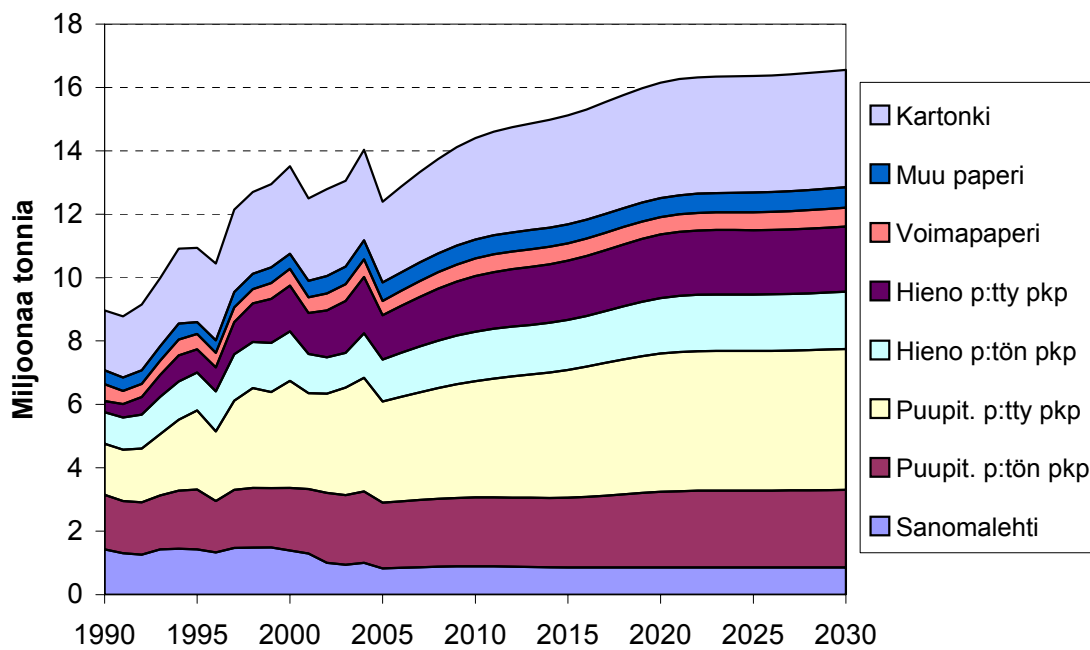
Kuva 13. Suomen skenaarioissa käytetty bruttokansantuotteen kehitysarvio vuoteen 2030.

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. Tarkasteluissa käytettiin KTM:ltä saatuja kehitysarvioita jokseenkin sellaisenaan. Arvioita on havainnollistettu kuvassa 15. Kehitysarvion mukaan massan ja paperin tuotannon arvioidaan kasvavan alle prosentin vuodessa vuoden 2020 jälkeen, mikä vastaa metsäteollisuuden kehitysarviota myös ilmastomuutoksen kansallisessa sopeutumisstrategiassa (Marttila et al. 2005).

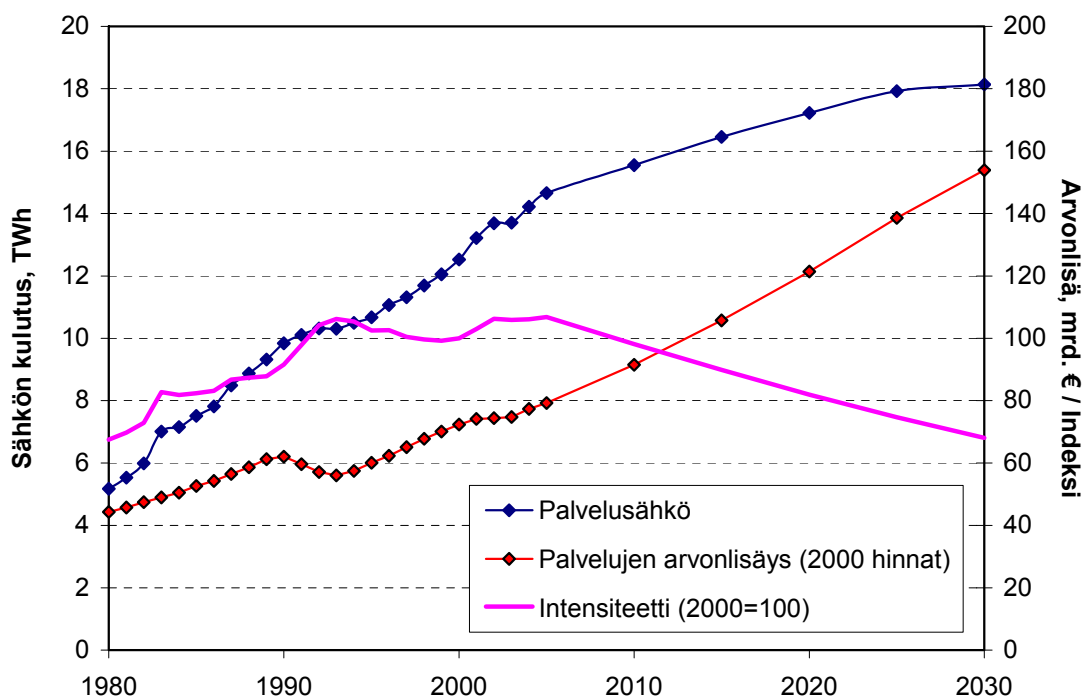
Palvelusektorin merkitys on kasvanut viime vuosina tuntuvasti sähköenergian kokonaiskulutuksessa ja sitä kautta välillisesti myös sähköntuotannon päästöissä. Skenaarioissa käytettyjä perusuraoletuksia palvelujen arvonlisäyksen ja sähkönkulutuksen kehityksestä on havainnollistettu kuvassa 16. Poliittikkaskenaarioissa kulutus voi luonnollisesti joustaa perusuran tasolta alaspäin, mutta toisaalta joissakin energiapalveluissa kulutus voi periaatteessa lisääntyäkin, jos sähköistyminen muodostuu edulliseksi.



Kuva 14. Bruttokansantuotteen kehitysarvioiden vertailua (VTT-07 = tarkastelussa käytetty).



Kuva 15. Suomen tarkasteluissa käytetty paperi- ja kartonkiteollisuuden tuotannon kehitysarvio.



Kuva 16. Palvelujen arvonlisäys ja sähkön kulutus perusraskenaariossa vuoteen 2030.

Laskelmissa käytetyt energian tuontihintojen kehitysarviot perustuvat IEA:n julkaisemiin arvioihin vuodelta 2006 (IEA 2006). 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 sisällä TIMES-mallissa hintataso määräytyy kysynnän ja tarjonnan mukaan, mihin siis vaikuttavat myös pohjoismainen sähkön hinta ja siirtokapasiteetti.

Skenaarioissa käytetyt oletukset tekniikoiden kehittymisestä ja uusien tekniikoiden kustannuksista ovat perusarvioita eli verraten konservatiivisia, joskin arviot vaihtelevat lähteestä riippuen. Konventionaalaisia tekniikoita koskevat teknologiaoletukset ovat suurelta osin samoja kuin KTM:lle vuonna 2005 tehdyissä laskelmissa (Forsström & Lehtilä 2005), mutta uusien tekniikoiden osalta tietoihin on tehty päivityksiä, jotka perustuvat kansainvälisiin lähteisiin (mm. IEA 2004, IEA 2005b, DEA 2005) ja VTT:n omiin asiantuntija-arvioihin (mm. tuulivoima).

Bioenergian tuotantopotentiaaleja koskevat oletukset perustuvat VTT:n päästökaupaselvitysten yhteydessä laatimiin asiantuntija-arvioihin (Koljonen et al. 2004). Koska potentiaaleista on kuitenkin esitetty hieman eri perusteita tehtyjä arvioita, työssä pyrittiin käyttämään nimenomaan perusarvioita, jotka ovat jonkin verran suurimpia esitettyjä arvioita (ns. maksimiskenaarioita) pienempiä.

Ydinvoimakapasiteetin oletettiin pysyvän uuden laitoksen valmistuttua vakiona vuoteen 2030 saakka. Vesivoiman tuotannon enimmäismääräksi oletettiin 13.4 TWh vuonna 2010, 14,1 TWh vuonna 2020 ja 15 TWh vuonna 2030. Tuotannon lisäyspotentiaalista suurin osa on pienvesivoimaa. Tuulivoiman tuotannon enimmäismääräksi oletettiin vastaavasti vajaat 0,7 TWh vuonna 2010, jonka jälkeen tuotannon oletettiin voivan kasvaa varsin ripeästi enimmillään 4,9 TWh:n määrään vuonna 2020 ja noin 12 TWh:n määrään vuonna 2030. Vuoden 2010 enimmäismäärä perustuu Eloktrouwatt-Ekonon selvitykseen ja sen jälkeiset tuulivoiman potentiaalit VTT:n asiantuntija-arvioihin.

### **Tarkastellut skenaariot**

Tarkasteltavina skenaarioina ovat seuraavat:

- Baseline eli perusuraskenaario
- Päästöjen rajoitusskenaariot, joissa oletetaan kansainvälinen päästökauppa ja Suomen kokonaispäästöjen vähennystavoitteeksi  $-0\%$  vuonna 2010,  $-10\%$  vuonna 2020 ja  $-20\%$  vuonna 2030 vuoden 1990 päästöihin verrattuna. Lisäksi raportissa arvioidaan päästöoikeuksien ostotarvetta ja siitä

aiheutuvia kustannuksia siinä tapauksessa, että Suomen päästörajoitustavoite on –20 % vuonna 2020 ja –30 % vuonna 2030.

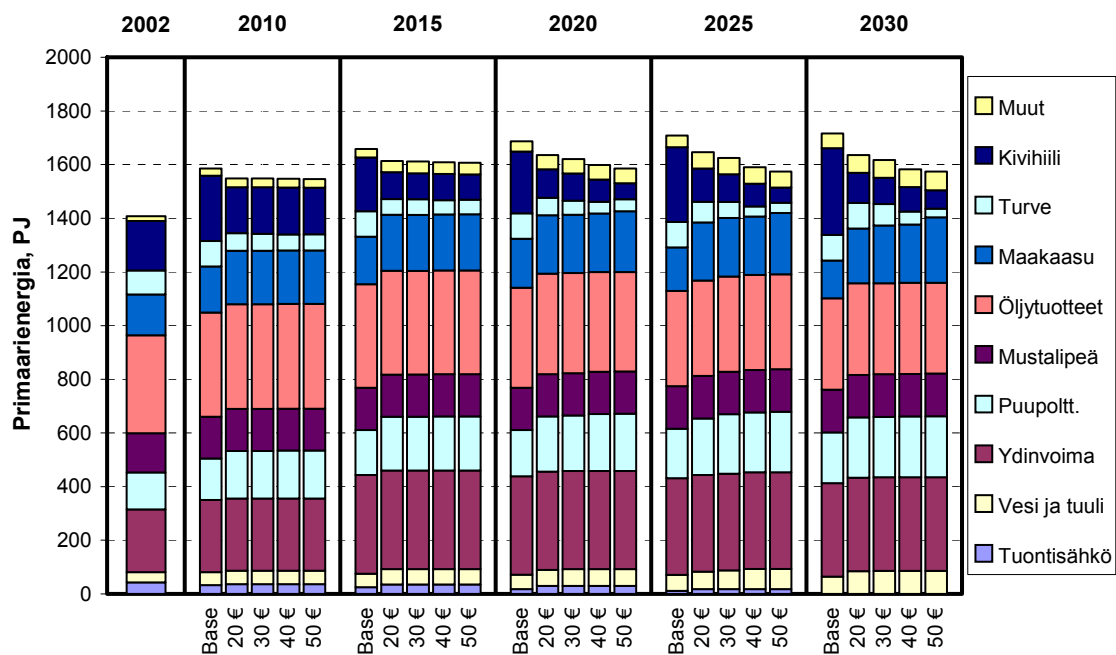
Päästöoikeuksien kaupassa päästöoikeuksien hinnaksi oletetaan 20 €, 30 €, 40 € tai 50 € tonnilta (CO<sub>2</sub>-ekv.) vuosina 2016–2030. Vuoteen 2015 saakka oikeuksien hinnan oletetaan olevan kaikissa tapauksissa 20 € tonnilta.

Päästökaupan piiriin oletettiin laskelmissa kuuluvan vain EU:n nykyiseen päästökaupajärjestelmään kuuluvat päästöt. Muiden kasvihuonekaasujen kuin hiilidioksidin päästöjen oletettiin siis jäävän kokonaan päästökaupan ulkopuolelle.

## 4.2 Energian kokonaiskulutus

Suomen primaarienergian kokonaiskulutus nousee perusskenaariossa noin 1 590 PJ:n määrään vuonna 2010. Määrä on hieman suurempi kuin ministeriöiden vuonna 2005 ilmasto- ja energiastrategiaa varten laatimassa WM-skenaariossa. Vuonna 2020 kulutus on perusskenaariossa noin 1 690 PJ, joka sekin on jonkin verran suurempi kuin vuonna 2005 laaditussa WM-skenaariossa. Energian kulutuksen hieman voimakkaampi kasvu johtuu suuremmista talouskasvuoletuksista. Kuvassa 17 on esitetty primaarienergian kulutuksen kehitys skenaarioissa vuoteen 2030 saakka. Perusuraskenaarion tuloksia voidaan pitää vertailukohtana tarkasteltaessa päästöjen rajoitusskenaarioiden vastaavia tuloksia.

**Kivihiilen** kokonaiskäyttö on kaikissa päästöjen rajoitusskenaarioissa vuonna 2010 170–180 PJ, eli suunnilleen samalla tasolla kuin esimerkiksi vuonna 2002. Hiilen kulutus pysyy kohtuullisella tasolla pääosin uuden ydinvoimalaitoksen valmistumisen lykkääntymisen takia. Vuoden 2010 jälkeen hiilen kulutus vähenee tuntuvasti ja jää kaikissa rajoitusskenaarioissa alle 100 PJ:n. Perusmetallien jalostuksessa käytettävän metallurgisen kivihiilen ja koksen käyttö kasvaa kuitenkin tasaisesti, sillä nykyinen tuotantotekniikka ei tarjoa sille juuri vaihtoehtoja. Energiantuotantoon käytetyn hiilen määrä vähenee siten vielä tuntuvammin kuin kokonaiskulutuksesta voi suoraan nähdä.

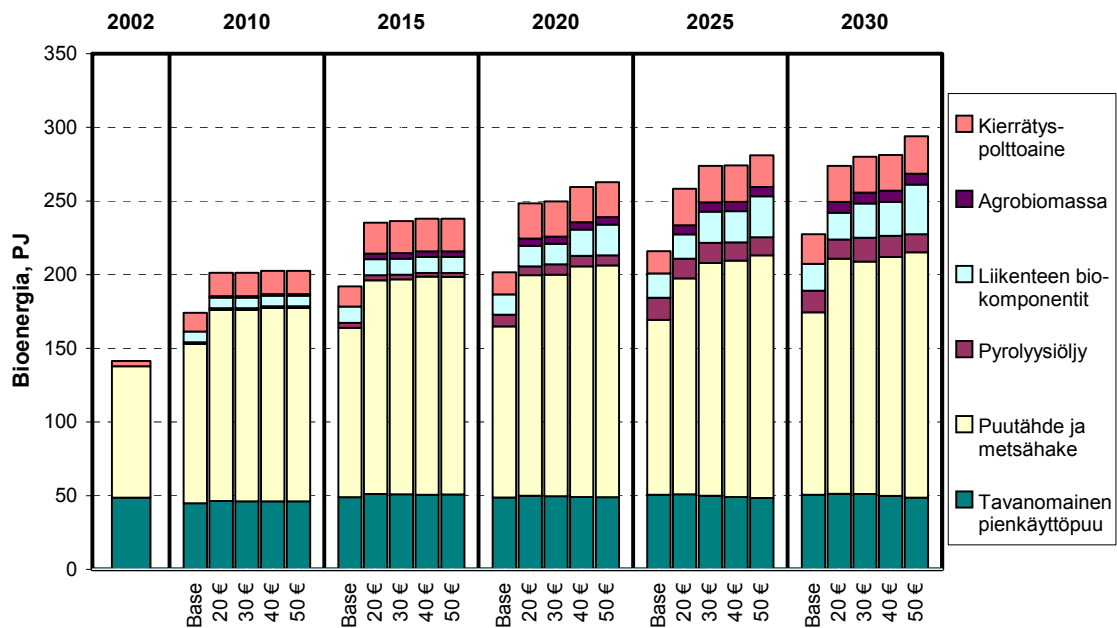


Kuva 17. Primaarienergian kokonaiskulutus tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2025.

**Maakaasun** kokonaiskäyttö kasvaa kaikissa päästöjen rajoitusskenaarioissa noin 200 PJ:n määrään vuonna 2010. Vuoteen 2020 mennessä kulutus kasvaa edelleen 220–230 PJ:n määrään, kun perusuralla kulutus jää 200 PJ:n tasolle. Vuoden 2020 jälkeen maakaasun kulutus pysyy rajoitusskenaarioissa suunnilleen vuoden 2020 tasolla lukuun ottamatta 50 €/t:n skenaariota, jossa kulutus nousee 240 PJ:n tasolle hiilidioksidin talteenottotekniikan käyttöönoton ansiosta.

**Polttoturpeen** käyttö vähenee rajoitusskenaarioissa tuntuvasti verrattuna perusskenaarioon. Vuonna 2010 turpeen kokonaiskulutus laskee päästöjen rajoitusskenaarioissa noin 60 PJ:n tasolle. Vuonna 2020 turpeen kulutus on rajoitusskenaarioissa 45–65 PJ päästöoikeuksien hintatasosta riippuen. Vuoteen 2030 mennessä kulutus kuitenkin alkaa nousta lievemman hintatason rajoitusskenaarioissa. Päästöoikeuksien hintatasolla 20 €/n turpeen kulutus nousee jopa 95 PJ:n määrään vuonna 2030, sillä turpeen hyvin vakaana pysyvä hinta kompensoi sen päästöjen aiheuttamia lisäkustannuksia.

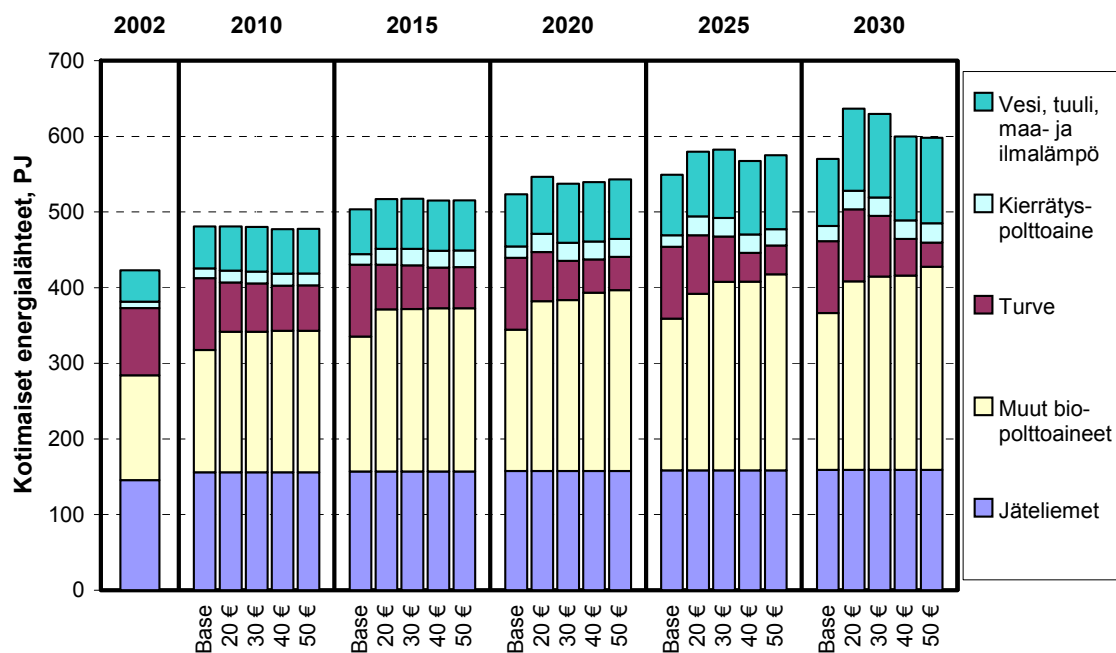
**Öljyn** kokonaiskäyttö kasvaa kaikissa skenaarioissa hieman vuoteen 2010 mennessä mutta laskee sen jälkeen hitaasti siten, että vuonna 2025 kulutus on jo nykytason alapuolella. Päästöjen rajoitusskenaarioissa öljyn kulutuksen väheneminen on jonkin verran perusuraa nopeampaa.



Kuva 18. Suomen bioenergian ja kierrätyspolttoaineiden kokonaiskäyttö (ilman puunjalostuksen jäteliemiä) tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2025.

**Bioenergian** hyödyntäminen kasvaa kokonaisenergiataseessa merkittävästi. Puupolttoaineita käytetään vuoteen 2030 mennessä 35–60 prosenttia enemmän kuin vuonna 2002, kun mustalipeää ei lasketa mukaan. Kaikissa päästöjen rajoitusskenaarioissa jätettä hyödynnetään energiaksi huomattavasti runsaammin kuin nykyisin. Vuoteen 2020 mennessä jätteen energiakäyttö nousee useimmissa tapauksissa 20 PJ:n tuntumaan. Myös vesi- ja erityisesti tuulivoimaa hyödynnetään vuoteen 2025 mennessä tuntuvasti nykyistä enemmän.

Bioenergian ja muiden uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen kasvaa päästöjen rajoitusskenaarioissa varsin ripeästi. Bioenergian kokonaiskäyttö kasvaa vuoteen 2010 mennessä päästökauppaskenaarioissa noin 360 PJ:n määrään. Lisäys vastaa melko hyvin esitettyjä tavoitteita, joista esimerkkinä voidaan mainita Uusiutuvan energian edistämisohjelmassa (KTM 2003) bioenergian käytölle asetettu tavoite 349 PJ vuonna 2010. Päästöjen rajoitusskenaarioissa puun pienkäyttö jää kuitenkin suurimmillaankin runsaan 50 PJ:n tasolle. Pienkäytössä erityisesti puupellettien käyttö kasvaa tuntuvasti vuoden 2003 määrästä (0,25 PJ), mutta sen markkinaosuus jää skenaarioissa silti verrattain pieneksi. Metsähakkeen tuotanto nousee vuoteen 2010 mennessä päästökauppaskenaarioissa noin 40 PJ:n tasolle vuonna 2010. Kuvassa 18 on havainnollistettu bioenergian ja kierrätyspolttoaineiden käytön kehitystä eri skenaarioissa.



Kuva 19. Kotimaisten energialähteiden kokonaiskulutus eri skenaarioissa vuoteen 2030.

**Kotimaisten energialähteiden** hyödyntäminen kasvaa verrattain tasaisesti kaikissa skenaarioissa, kuten voidaan nähdä kuvasta 19. Vuoteen 2015 saakka bioenergian ja kierrätyspolttoaineiden käytössä on ylivoimaisesti merkittävin kotimaisen energian hyödyntämisen lisäspotentiaali. Vuodesta 2020 lähtien kuitenkin myös tuulivoima ja maalämpö voivat saada jo näkyvämmän sijan kotimaisina energialähteinä.

Tuulivoiman tuotantotavoite oli vuosien 2003–2006 uusiutuvan energian edistämishjelmassa 1,1 TWh vuonna 2010 ja 5,1 TWh vuonna 2025. Vuoden 2010 tavoitetta ei kuitenkaan voida enää saavuttaa, minkä vuoksi skenaarioissa tuulivoimakapasiteetin ylärajaksi asetettiin noin 300 MW vuonna 2010. Tämä kapasiteetti myös rakennetaan kaikissa päästöjen rajoitusskenaarioissa, ja vuoden 2010 jälkeen tuulivoiman lisäys jatkuu suunnilleen edistämishjelmien tavoitteiden mukaisena. Vesivoiman tavoitteelliseksi tuotantopotentiaaliksi on esitetty 14,5 TWh vuonna 2010 ja peräti 16 TWh vuonna 2025 (KTM 2003). Lisäyksestä suurin osa koskee pienvesivoimaa. Tarkastelluissa skenaarioissa vesivoiman määrä rajoitettiin vuonna 2005 laaditun ministeriöiden WM-skenaarion mukaisesti, joten suurimpien arvioiden mukaista tuotantoa ei skenaarioissa ollut mahdollista saavuttaa. Vuoteen 2030 mennessä vesivoiman tuotanto kasvaa kuitenkin kaikissa skenaarioissa noin 15 TWh:n määrään. Jo pelkästään fossiilisten polttoaineiden hintojen nousu tekee lisäyksen kannattavaksi.

Kotimaisten energialähteiden yhteenlaskettu osuus primaarienergian kokonaiskulutuksesta pysyy perusuralla lähes vakiona eli noin 30 %:ssa. Päästöjen rajoitusskenaarioissa osuus kasvaa nykyisestä suurimmillaan noin 39 %:iin vuonna 2030.



**Uusiutuvien energilähteiden** osuus primaarienergian kokonaiskulutuksesta on esitetty taulukossa 2. Osuus kasvaa perusurassa tasaisen hitaasti noin 28 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Päästökauppaskenaarioissa osuus kasvaa huomattavasti suuremmaksi ja on vuonna 2030 päästöoikeuksien hinnasta riippuen 33–36 %.

*Taulukko 2. Uusiutuvien energialähteiden osuus primaarienergian kokonaiskulutuksesta.*

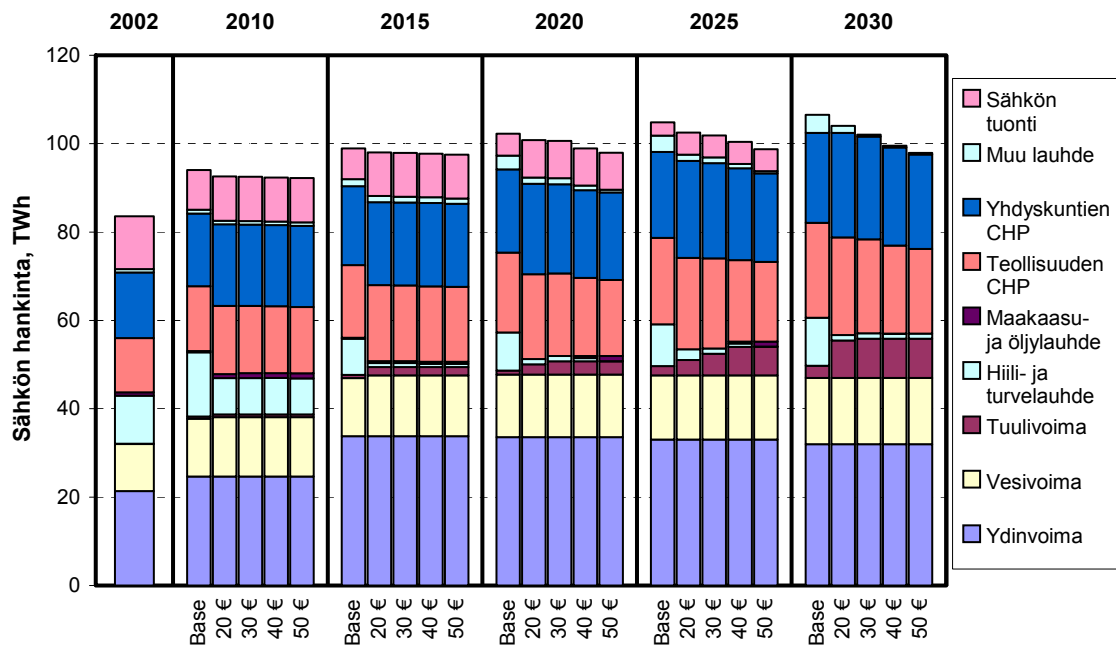
	2002	2010	2015	2020	2025	2030
Base	23.5%	24.3%	24.6%	25.4%	26.6%	27.7%
20 €	23.5%	26.9%	28.4%	29.4%	30.5%	33.1%
30 €	23.5%	26.9%	28.5%	30.0%	32.2%	34.0%
40 €	23.5%	27.0%	28.7%	31.0%	33.3%	34.8%
50 €	23.5%	27.0%	28.7%	31.5%	34.1%	36.0%

### 4.3 Sähkön hankinta ja kulutus

Sähköenergian kokonaiskulutus kasvaa perusskenaariossa vuonna 2010 noin 94 TWh:n määrään, kun vuoden 2005 ministeriöiden WM-skenaariossa kulutusarvio oli 95,5 TWh. Hieman pienempi kokonaiskulutus johtuu oletettua hitaammasta kulutuksen toteutu-neesta kasvusta vuosina 2005–2007. Kuvassa 20 on esitetty sähkön kokonaishankinnan rakenteen kehitys eri skenaarioissa.

Ydinvoiman tuotanto lisääntyy vuonna 2011 valmistuvan uuden 1 600 MW:n voimalaitoksen ansiosta. Skenaarioissa laitoksen on oletettu olevan koekäytössä jo vuonna 2010 ja tuottavan jonkin verran sähköä yleiseen verkkoon. Täydessä kaupallisessa käytössä laitoksen on oletettu olevan vasta vuonna 2015. Vuodesta 2015 vuoteen 2030 ydinvoimakapasiteetin on oletettu pysyvän vakiona. Ennen vuotta 2015 tarvitaan siten kaikissa skenaarioissa kohtuullisen runsaasti kivihiili- ja turvelauhdevoiman tuotantoa. Päästöjen rajoitusskenaarioissa hiili- ja turvelauhdevoiman tuotanto supistuu vuodesta 2011 lähtien hyvin vähäiseksi. Myös maakaasulauhdevoiman merkitys jää kaikissa skenaarioissa marginaaliseen rooliin koko tarkasteluaikavälillä.

Yhteistuotannon määrä kasvaa kaikissa skenaarioissa tasaisesti nykyisestä. Vuonna 2010 tuotanto on 32–34 TWh, kun se oli vuonna 2003 noin 28 TWh. Vuoden 2010 jälkeen yhteistuotannon määrä kasvaa nopeammin. Lisäys kohdistuu tällöin voimakkaimmin teollisuuden yhteistuotantoon, jossa rakennusasteen nostamisen potentiaali on huomattava.



Kuva 20. Sähkön kokonaishankinnan rakenne tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030.

Suurimmaksi yhteistuotanto kasvaa 20 €/t:n päästökauppaskenaariossa, jossa yhteistuotanto nousee vuonna 2030 noin 46 TWh:n määrään. Korkeimman päästöoikeuksien hinnan skenaariossa tuotannon määrä jää 41 TWh:n määrään, mikä johtuu selvästi pienemmästä sähkön kokonaiskulutuksesta.

Rakennettava uusi yhteistuotantokapasiteetti on päästöjä rajoitettaessa kaukolämpösektorilla vuoteen 2020 saakka maakaasualueella suurelta osin maakaasukombiteknikkaa sekä Itä- ja Pohjois-Suomessa leijukerrostekniikkaa. Näiden lisäksi pienen kokoluokan laitoksissa voisi tulla käyttöön kaasutusmoottoriteknologiaa, jossa kiinteän polttoaineen kaasutin on integroitu moottorivoimalaitokseen. Vuodesta 2020 lähtien käyttöön tulee myös varsinaisia IGCC-laitoksia. Myös teollisuudessa maakaasukombilaitoksia otetaan vuoteen 2020 mennessä entistä laajemmassa mitassa käyttöön. Massa- ja paperiteollisuudessa otetaan korkeimpien päästöoikeuksien hintojen skenaarioissa lisäksi jo vuoden 2015 jälkeen käyttöön puubiomassan kaasutukseen perustuvia IGCC-laitoksia sekä vuoden 2020 jälkeen jäтелиemen kaasutuslaitoksia. Kemianteollisuudessa ja öljynjalostuksessa kaasuturbiinitekniikat säilyttävät asemansa.

Tuulivoiman tuotanto ei kasva perusuralla vuoteen 2010 mennessä merkittävästi, mutta vuoteen 2020 mennessä saavutetaan 0,9 TWh:n tuotantotaso. Sen sijaan kaikissa päästöjen rajoitusskenaarioissa tuotanto kasvaa jo vuonna 2010 oletettuun enimmäismäärään, joksi arvioitiin vajaat 0,7 TWh Elektrowatt-Ekonon laatiman selvityksen perusteella. Vuonna 2020 tuotanto on rajoitusskenaarioissa jo 2,3–3,0 TWh päästöoikeuksien hinnan mukaan. Vuonna 2030 tuulivoiman tuotanto nousee kaikissa rajoitusskenaarioissa

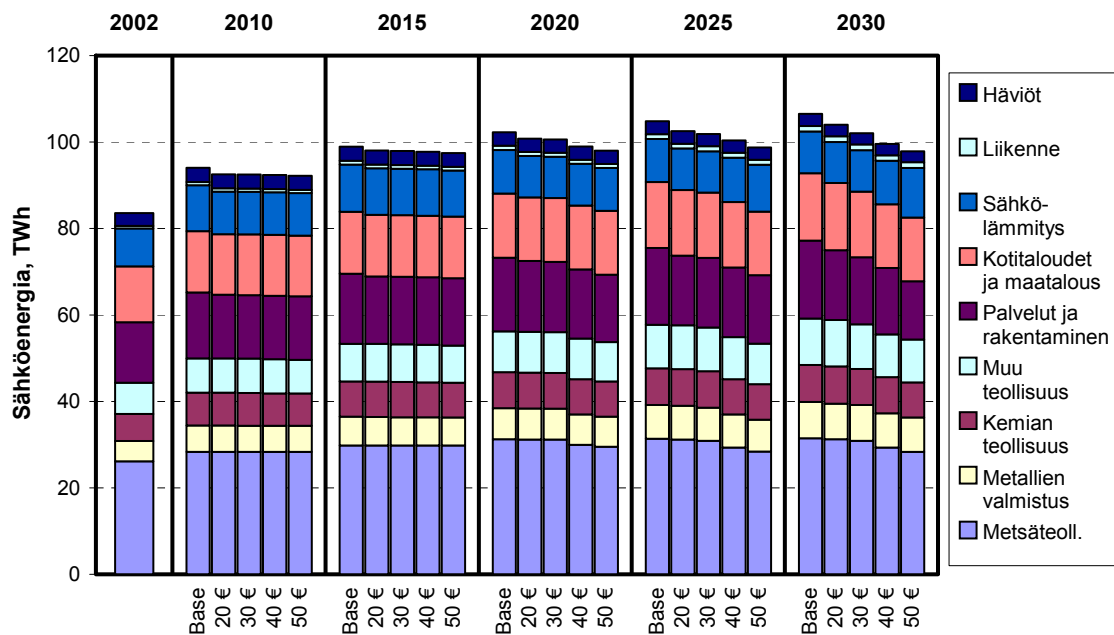
jo 8–9 TWh:n määrään, joka on VTT:n tuulivoima-asiantuntijoiden mukaan vielä realistinen määrä.

Hiilidioksidin talteenotto ja loppusijoitus on eräs lupaava fossiilisten polttoaineiden käytön hiilidioksidipäästöjä vähentävä teknologia. Sitä tulee tarkasteluissa käyttöön 30 €:n hintatasosta alkaen, ensiksi tosin vain länsirannikolle (mm. Raahen terästehdas) vuoden 2020 jälkeen. Korkeimmalla hintatasolla hiilidioksidin talteenotto tulee käyttöön myös pääkaupunkiseudun maakaasukombivoimalaitoksissa. Hiilidioksidin kuljetuksen ja loppusijoituksen kustannukset on arvioitu noin 1 000 km kuljetusmatkan perusteella (Norjan rannikko), jolloin loppusijoituksen yksikkökustannukseksi tulee noin 10 €/t(CO<sub>2</sub>).

Sähkön nettotuonnin merkitys sähkön kokonaishankinnassa on ollut viime vuosina keskimäärin varsin suuri, mutta myös vuotuiset vaihtelut ovat olleet suuria. Järjestelmämallissa voitaisiin antaa sähkön tuonnin ja viennin määräytyä vapaasti arvioitujen markkinahintojen mukaan. Tarkastelluissa skenaarioissa sähkön nettotuonnille asetettiin kuitenkin vuosille 2010–2020 kiinteä alaraja, joka perustuu VTT:n sähkömarkkinamallin tuloksiin (Kekkonen & Pursiheimo 2005). Vasta vuonna 2030 tuonti määräytyy mallissa vapaasti sähkömarkkinamallilla arvioitujen perushintojen ja päästökaupasta johtuvan lisähinnan mukaan. Tulosten mukaan päästöjen rajoitusskenaarioissa sähköä kannattaa tuoda Suomeen vuonna 2010–2020 noin 10 TWh, mikä ylittää hieman asetetun alarajan. Vuonna 2020 tuonti putoaa asetetulle alarajalleen 8,4 TWh, ja vuonna 2030 tuonti putoaa nolnaan.

Sähkön kokonaiskulutuksen kehitys sektoreittain voidaan nähdä kuvasta 21. Kuten edellä mainittiin, vuonna 2010 kokonaiskulutus on perusuralla noin 94 TWh, mutta rajoitusskenaarioissa kulutus jää 1–1,5 TWh pienemmäksi. Erotus johtuu sekä säästötoimista että sähkölämmityksen markkinaosuuden eroista eri skenaarioiden välillä.

Vuoteen 2030 mennessä erot perusuran ja rajoitusskenaarioiden välillä luonnollisesti kasvavat, sillä sekä tehostustoimien potentiaali että uuden laite- ja rakennuskannan määrä on huomattavasti suurempi. Perusurassa kulutus on vuonna 2030 vajaat 107 TWh, mutta korkeimpien päästöoikeuksien hintojen skenaariossa vain 98 TWh. Muissa päästökauppa-skenaarioissa kulutus asettuu näiden ääripäiden välille. Tällöin suurin osa kulutuksen vähennyksestä johtuu tehostustoimista. Tuntuvimmat säästöinvestoinnit toteutetaan metsäteollisuudessa ja palveluissa, mutta myös kotitalouksissa ja muussa teollisuudessa on tiukoissa rajoitusskenaarioissa kustannustehokkaaksi tulevaa säästöpotentiaalia.



Kuva 21. Sähkön kokonaiskulutus sektoreittain tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030.

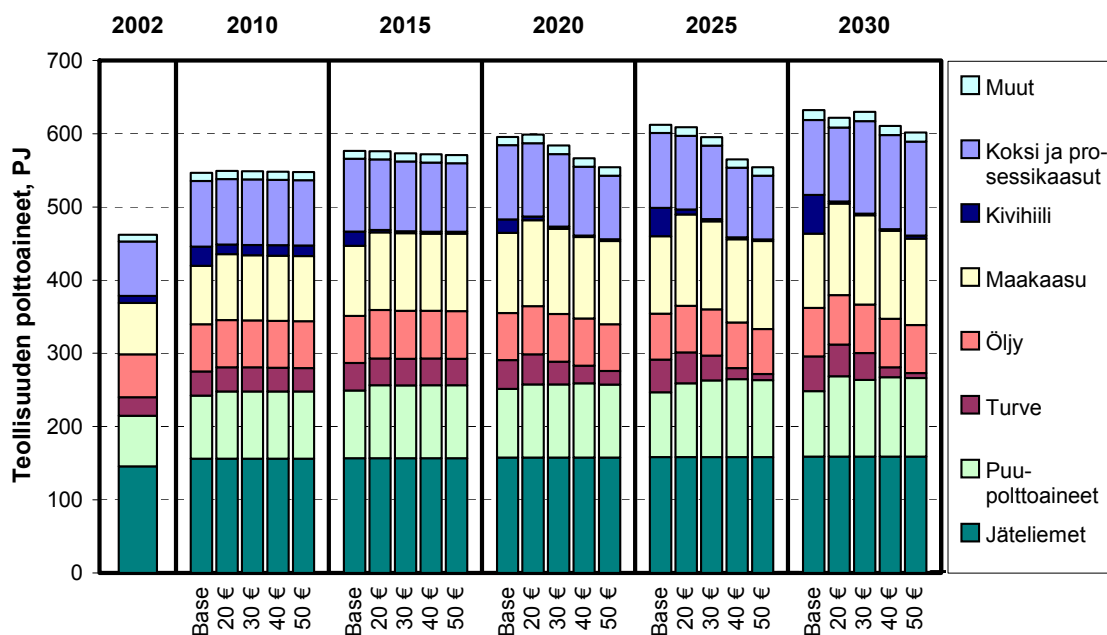
## 4.4 Energian loppukäyttö

### 4.4.1 Teollisuus

Teollisuuden polttoaineiden kulutuksen kehitys perusura- ja päästökauppaskenaarioissa on esitetty kuvassa 22. Perusurassa öljytuotteita ja rauta- ja terästeollisuuden prosessipolttoaineita lukuun ottamatta kaikkien polttoaineiden kulutus kasvaa teollisuudessa tasaisesti vuoteen 2020. Öljytuotteiden kulutus pysyy lähes vakiona, ja myös terästeollisuuden polttoaineiden kulutuksen kasvu tasaantuu noin vuonna 2015 tuotannon kasvun hidastumisen myötä.

Päästöjä rajoitettaessa selvimpiä muutoksia perusuraan verrattuna ovat seuraavat:

- Kivihiilen kulutus on kaikissa rajoitusskenaarioissa tuntuvasti pienempi.
- Maakaasun kulutus on rajoitusskenaarioissa 10–20 % perusuraa suurempi vuonna 2030.
- Puupolttoaineiden kulutus on rajoitusskenaarioissa 10–25 % perusuraa suurempi vuonna 2030.
- Turpeen kulutus on rajoitusskenaarioissa 10–80 % perusuraa pienempi vuonna 2030.
- Polttoaineiden kokonaiskulutus on rajoitusskenaarioissa 1–10 % perusuraa pienempi vuonna 2025, mutta vuonna 2030 erot pienenevät, sillä rajoitusskenaarioissa uuden koksaamon rakentaminen tulee kannattavaksi.

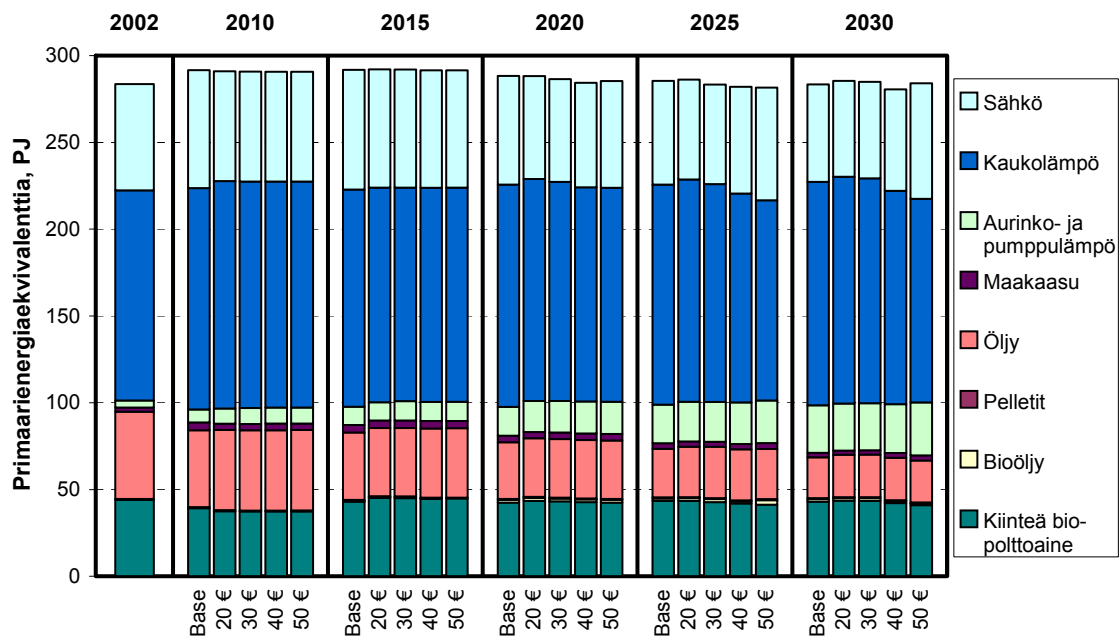


Kuva 22. Teollisuuden polttoaineiden kulutus tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030.

Polttoaineiden kokonaiskulutuksen pieneminen johtuu toisaalta säästötoimista, jotka tulevat päästökaupan takia kannattaviksi, ja toisaalta osittain teollisuuden pienemmästä CHP-tuotannon kasvusta rajoitusskenaarioissa.

#### 4.4.2 Rakennusten lämmitys

Suomessa on vuoden 2001 ilmastostrategian mukaisesti otettu käyttöön entistä tiukempia rakennusmääräyksiä. Lokakuusta 2003 lähtien voimaan astuneiden määräysten mukaan kaikkien uusien ympärivuotiseen käyttöön tarkoitettujen uudisrakennusten tulisi kuluttaa 25–30 % vähemmän lämmitysenergiaa aiempaan määräystasoon verrattuna. 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 suunnilleen aiemmalla tasolla tai kääntyy jopa hienoiseen laskuun. Rakennusten lämmitysenergian käytön kehitystä tarkastelluissa skenaarioissa on havainnollistettu kuvassa 23.



Kuva 23. Asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen energialähteiden kulutus tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030.

Oheislämpöjen hyödyntämisen ansiosta ominaiskulutusten pieneneminen 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 pieneneminen merkitsevät lämmityslaitteiden investointikustannusten nousua tuotettua lämpöenergiayksikköä kohti. Pääomavalttaisten lämmitystekniikoiden markkina-asema siten heikkenee, ja sähkölämmitystekniikoiden asema paranee ominaiskulutusten pienentyessä.

Tulosten mukaan useimmissa skenaarioissa sekä kaukolämmityksen että maalämmön markkinaosuudet kasvavat selkeimmin vuoteen 2030 mennessä. Sähkölämmityksen markkinaosuuden kehitys (mukaan lukien lämpöpumppujen käyttämä sähkö) vaihtelee päästöoikeuksien hinnan mukaan siten, että pienimmilleen sen osuus laskee 30 €/t:n skenaariossa. Biopolttoaineiden markkinaosuus pysyy kaikissa skenaarioissa varsin vakaana. Puulämmityksen kilpailukykyä heikentää sen tuottamat verraten korkeat metaanipäästöt.

Tavanomainen öljylämmitys on tulosten mukaan lämmitysmuotojen markkinaosuuksissa selvin häviöjä. Öljyn kilpailukyky heikkenee jo perusurassa lähinnä maailmanmarkkinahintojen nousun myötä. Päästöjä rajoitettaessa vähäpäästöisten lämmitysmuotojen asema vahvistuu, ja tulosten mukaan myös pyrolyysiöljykattiloiden tulevalle kehitystyöllä saattaa olla merkitystä mineraaliöljyn käytön ja siitä aiheutuvien päästöjen

vähentämisessä. Skenaarioissa käytettyjen verraten varovaisten oletusten mukaan pyrolyysiöljy tulee kuitenkin vain marginaalisesti kilpailukykyiseksi lämmitysenergian lähteeksi suunnilleen vuoden 2020 tienoilla.

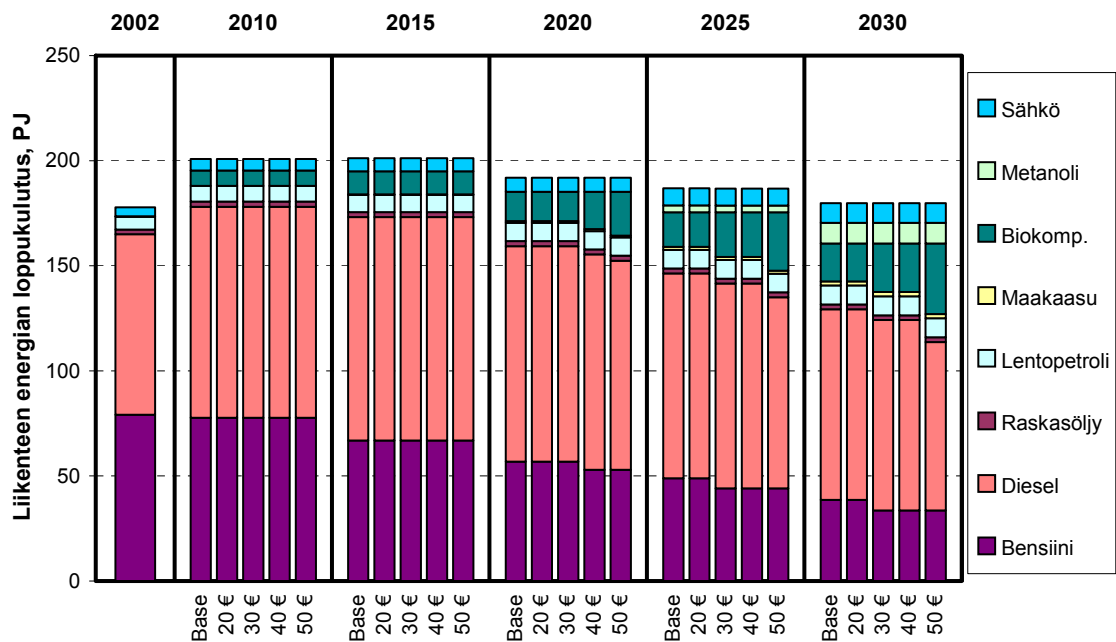
Lämpöpumpputeknologioista sekä ilma- että maalämpöpumppujen markkinat kasvavat kaikissa skenaarioissa nopeasti, vaikka erityisesti maalämpöpumppujärjestelmät ovatkin varsin pääomavaltaisia. Tulevaisuudessa ilmalämpöpumppujärjestelmien kilpailukykyä parantaa myös niiden hyödyntäminen sekä lämmitykseen että jäähdytykseen.

Ilmaston lämpenemisen odotetaan vähentävän tuntuvasti lämmitysenergian tarvetta Suomessa. Jäähdytystarpeen kasvu toisaalta suurenee jonkin verran, mutta siitä huolimatta rakennusten lämpöjärjestelmien ominaisenergiankulutuksen voidaan arvioida kokonaisuutena huomattavasti pienenevän. Koska skenaariot ulottuivat vain vuoteen 2030 saakka, skenaariolaskelmissa ei otettu lämpenemisen aiheuttamaa lämmitystarpeen pienenemistä huomioon.

#### **4.4.3 Liikenne**

Liikenteen sektorilla kasvihuonekaasujen kehitykseen voivat vaikuttaa merkittävästi paitsi teknologian kehittyminen myös eri liikennemuotojen markkinaosuudet sekä muutokset yhdyskuntarakenteessa. Työssä tehdyissä skenaariotarkasteluissa sekä liikennemuotojen osuuksien että yhdyskuntarakenteen kehittymisestä käytettiin kuitenkin kiinteitä skenaarioita, joten skenaariot eroavat ainoastaan kunkin liikennemuodon sisäisen teknologian kehityksen ja markkinaosuuksien osalta. Skenaariotulosten mukainen liikenteen energialähteiden kulutuksen kehitys on esitetty kuvassa 24.

Skenaarioissa oletetut tieliikennesuoritteiden kasvun kehitysarviot ovat samankaltaisia kuin VTT:n LIPASTO-mallilla tehdyissä laskelmissa. Kaikissa skenaarioissa oletettiin tavanomaisen ottomoottoritekniikan kehittyvän EU:n autonvalmistajien kanssa tekemän sopimuksen vaatimuksia hitaammin. Uusien henkilöautojen keskimääräisen polttoainekulutuksen alenemisen tavoitteeksi asetetulle 5 l/100 km tasolle oletettiin viivästyvän noin vuoteen 2020 saakka. 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.



Kuva 24. Liikenteen energialähteiden kulutus tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030.

Tavanomaistenkin 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 päästöjen rajoitustoimena vähitellen yhä kannattavammaksi päästöoikeuksien hinnan noustessa. Kannattavuus nousisi kuitenkin vielä huomattavasti paremmaksi, jos biopolttoaineen voitaisiin olettaa olevan kokonaisuudessaan tuontienergiaa. Skenaarioissa oletettiin kuitenkin, että 50 % biokomponenteista on tuotettava Suomessa metsäpolttoaineesta. Biokomponenttien lisäkäyttö liikennepolttoaineissa vähentää siten skenaarioissa metsäpolttoaineen käyttöpotentiaalia muilla sektoreilla ja nostaa metsäpolttoaineen hintaa.

Joko suoraan tai välillisesti vedyn käyttöön perustuvilla polttokennoajoneuvoilla voitaisiin vähentää liikenteen kasvihuonekaasujen päästöjä hyvin merkittävästi. Skenaa-



rioissa tämä teknologiavaihtoehto tulee olemaan oletusten mukaisen teknisen kehityksen ansiosta käyttöön vuoden 2020 jälkeen. Vuoteen 2050 mennessä jo suurin osa ajoneuvokannasta olisi vetypolttokennoautoja.

## **4.5 Kasvihuonekaasupäästöt**

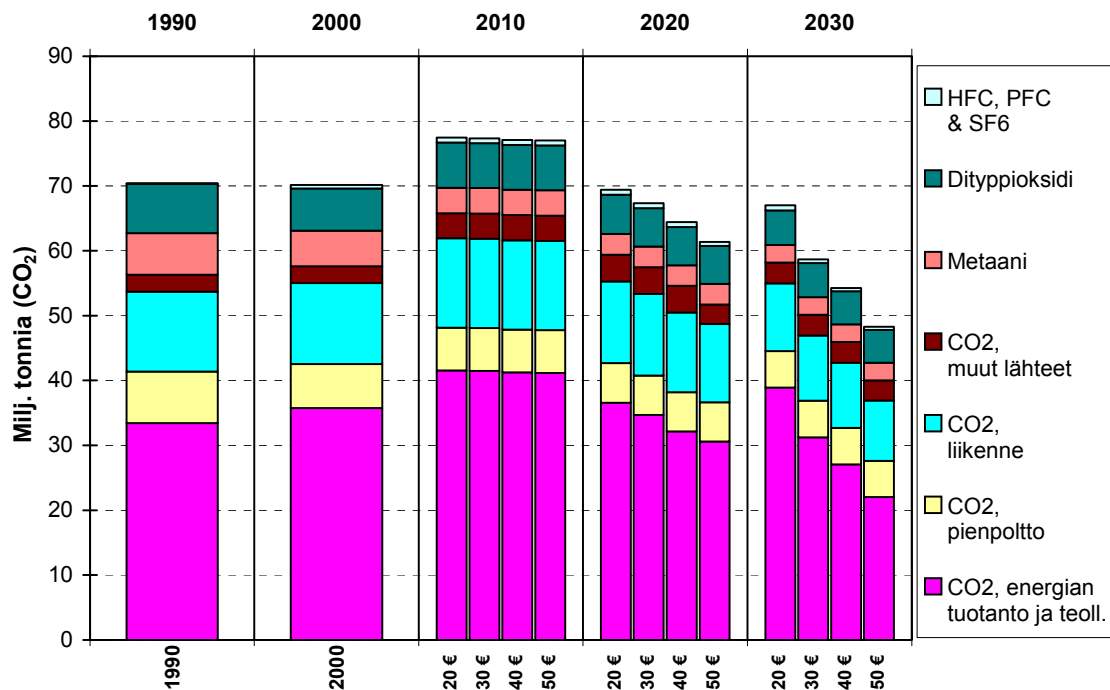
### **4.5.1 Kasvihuonekaasujen päästötase**

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 CO<sub>2</sub>-ekvivalentteina. Päästöjen rajoittamista koskevien tulosten vertailukohdaksi kuvassa 25 on esitetty päästöjen kehitys pääluokittain kotimaisten toimien skenaarioissa.

Jos kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseksi ei tehtäisi Suomessa erityisiä lisätoimia, päästöjen kokonaismäärä kasvaisi mallilaskelmien mukaan vuoden 1990 70,4 miljoonasta tonnista vuoteen 2010 mennessä noin 86 miljoonaan tonniin. Vuonna 2011 valmistuvaksi oletetun Olkiluodon uuden 1 600 MW:n ydinvoimalaitoksen ansiosta päästöjen määrä olisi vuonna 2015 kuitenkin tätä selvästi pienempi, ja se kasvaisi vuoteen 2030 mennessä vähitellen takaisin 86 miljoonan tonnin tasolle.

Uuden ydinvoimalaitoksen valmistumisen viivästymisen takia Kioton periodilla tarvitaan siis tulosten mukaan päästöjen vähennyksiä noin 16 miljoonaa tonnia vuodessa. Vuoden 2015 jälkeenkin suurin paine päästöjen lisäykseen on energian tuotannossa, kuten myös kuvan 25 tuloksista voidaan nähdä. Korkeampien päästöoikeuksien hintojen skenaarioissa päästöt sen sijaan alkavat vähentyä myös energian tuotannossa.

Kivuttomimmin päästöjä voidaan tulosten mukaan vähentää vuoden 1990 tasosta pienpoltton hiilidioksidipäästöistä ja metaanipäästöistä. Vuoteen 2015 mennessä uuden ydinvoimalaitoksen käyttöönotto on kuitenkin päästötavoitteiden saavuttamisen kannalta keskeisin yksittäinen toimi. Kioton periodin jälkeen mitään vastaavan suuruisiin päästönvähennyksiin johtavia, helposti kohdennettavia keinoja ei ole näköpiirissä. Metaanipäästöjä voidaan silti edelleen edullisesti vähentää jätehuollon kehittämisen keinoin. Toinen merkittävä ja kokonaistaloudellisesti edullinen yksittäinen päästöjen vähennyskohde on typpihapon valmistus, jossa N<sub>2</sub>O-päästöjä voidaan rajoittaa katalyyttisin menetelmin arviolta noin 80 %.



Kuva 25. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt pääluokittain tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030.

Tulosten mukaan myös fluorattujen kaasujen (HFC, PFC, SF<sub>6</sub>) päästöjen tuntuva rajoittaminen on kokonaistaloudellisesti edullista. Jo vuoteen 2010 edullista vähennyspotentiaalia on noin 40 % perusuran mukaisesta määrästä, ja samansuuruinen osuus päästöistä kuuluu edullisimman potentiaalin piiriin myös vuoteen 2020. Korkeimpien hintojen skenaarioissa (50 €/t) fluorattujen kaasujen päästöjä kannattaisi vähentää vuoteen 2025 mennessä noin 60 % perusurasta.

Liikenteen päästöjen kasvu taittuu tulosten mukaan kaikissa skenaarioissa vuoteen 2015 mennessä. Mallissa kuvatut päästöjen rajoitustoimet liikennesektorilla rajoittuvat biokomponenttien käytön lisäämiseen sekä uusien hybridi- ja polttokennotekniikoiden käyttöönottoon. Ajokäyttytymiseen tai eri liikennemuotojen osuuksiin liittyviä toimia ei ole otettu huomioon, sillä niitä on vaikea tarkastella optimoinnin keinoin.

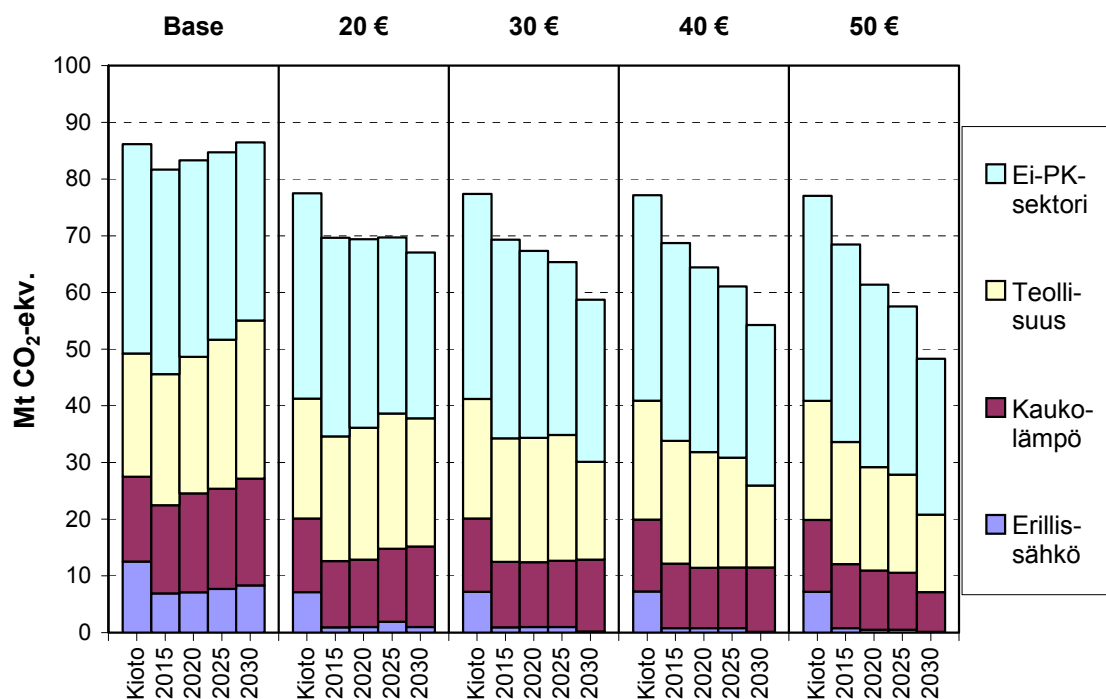
Rajoitusskenaarioissa todelliset kokonaispäästöt poikkeavat luonnollisesti asetetuista päästöjen tavoitetasoista joko ylös- tai alaspäin sen mukaan, onko päästöoikeuksien hinta tavoitetason mukaisia marginaalikustannuksia alempi vai korkeampi. Tulosten mukaan 20 €:n ja 30 €:n päästöoikeuksien hinnalla Suomi olisi päästöoikeuksien netto-ostaja skenaarioiden koko tarkasteluajavälillä. Sen sijaan 40 €:n ja 50 €:n hinnoilla suomalaisten yritysten kannattaisi tarkasteluajavälin loppupuolella myös myydä päästöoikeuksia.

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 Suomen päästörajoite vuonna 2020 on –20 % skenaariossa oletetun –10 %:n sijasta, Suomi joutuisi ostamaan päästöoikeuksia kaikissa tarkastelluissa päästöoikeuden hintaluokissa (20–50 €/tCO<sub>2</sub>).

#### 4.5.2 Päästöjen kehitys eri sektoreilla

Kasvihuonekaasupäästöjen kehityksessä eri sektoreilla on varsin huomattavia eroja. Tällä on merkitystä erityisesti päästökaupan kannalta. Päästöjen suhteelliset muutokset ovat suurimpia erillisessä sähköntuotannossa. Tavanomaisiin polttoaineisiin perustuvan konventionaalisen lauhdevoiman tuotannon kannattavuus heikkenee sitä enemmän, mitä korkeammaksi päästöoikeuksien hinta nousee. Korkeilla hintatasoilla tuotanto vähenee Kioton periodista lähtien käytännössä minimitasolle eli vain huippu- ja varavoimaksi. Päästöjen kehitystä päästökaupan piiriin kuuluvilla ja sen ulkopuolelle jäävillä sektoreilla on havainnollistettu kuvassa 26.



Kuva 26. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt päästökaupan piiriin kuuluvilla ja sen ulkopuolisilla sektoreilla tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030.

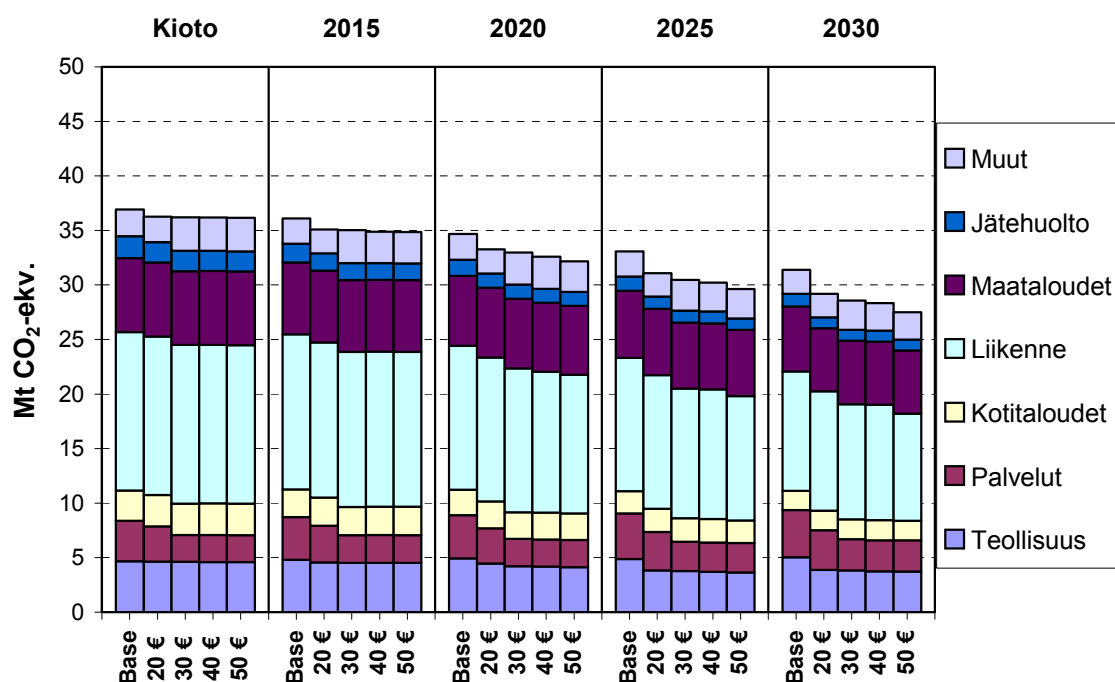
Päästökaupan vaikutus kaukolämmön ja kaukolämpövoiman päästöihin jää matalilla hintatasoilla tulosten mukaan melko pieneksi. Myös päästökaupan piiriin kuuluvassa teollisuudessa hinnat alkavat vaikuttaa tuntuvammin päästöihin vasta korkeammilla hintatasoilla. Kummassakin tapauksessa on kuitenkin otettava huomioon myös sähkön ja lämmön yhteistuotannon muutokset. Yhteistuotannon kasvu näillä sektoreilla vähentää välillisesti erillisen sähköntuotannon volyymia ja päästöjä. Päästökaupan vaikutukset teollisuuteen ja kaukolämpösektoriin ovat siten suurempia kuin sektorikohtaisten päästöjen perusteella voisi suoraan päätellä.

Prosessiteollisuudessa oletettiin myös joitakin päästöjen kannalta edullisia prosessikonsepteja voivan tulla käyttöön, mutta niihin liittyvän uuden teknologian oletettiin yleensä kaupallistuvan aikaisintaan vuoden 2020 tienoilla. Mekaanisen massan valmistuksessa otettiin huomioon biotekniset menetelmät, joiden avulla voidaan parhaimmillaan päästä 30 %:n vähennykseen sähkön ominaiskulutuksessa. Raudan valmistuksessa puolestaan oletettiin masuunit uusittavan vuoden 2020 jälkeen siten, että niissä voidaan käyttää reduktanttien kulutusta tuntuvasti tehostavaa hiili-injektointia.

Rakennusten lämmityksen ja maatalouden pienpolton hiilidioksidipäästöjen väheneminen jatkuu kaikissa skenaarioissa vuoden 2010 jälkeenkin. Vähennykset johtuvat erityisesti öljyn käytön vähenemisestä sekä kaukolämmön ja biopolttoaineiden markkinaosuuden kasvusta. Liikenteen päästöjen määrä kasvaa tulosten mukaan hieman vuoteen 2010 mennessä mutta alkaa sen jälkeen vähentyä vuoteen 2025 mennessä kaikissa skenaarioissa. Vuoden 2025 jälkeen polttokennoajoneuvojen nopea markkinoille tulo kääntää liikenteen päästöt jyrkkään laskuun.

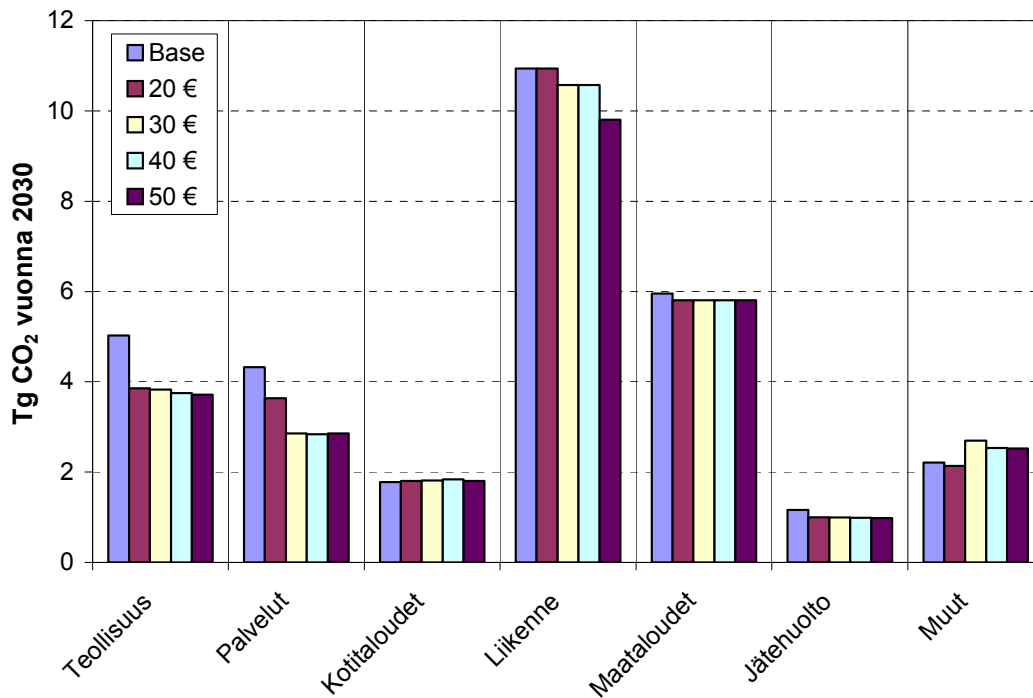
Metaanipäästöjen väheneminen jatkuu kaikissa skenaarioissa sekä ennen että jälkeen Kioton periodin. Koska jätehuoltoa koskevat säännökset johtavat joka tapauksessa jätteen kaatopaikkasijoituksen merkittävään vähenemiseen, skenaarioiden välillä ei ole metaanipäästöissä kovin suuria eroja. Maatalous on toinen merkittävä metaanipäästöjen lähde, mutta siellä päästönvähennysten kustannustehokas potentiaali on pieni.

Kuvassa 27 on havainnollistettu kasvihuonekaasupäästöjen kehitystä ei-päästökauppa-sektoreilla eri skenaarioissa. Mallilaskelmien mukaan näillä sektoreilla on vain niukasti edullista päästöjen vähennyspotentiaalia. Kioton periodilla päästöjen vähennys on vain noin 1 milj. tonnia perusuraan verrattuna ja vuonna 2030 se kasvaa suurimmillaankin vain 4 milj. tonnin tasolle, mikä vastaa 12 %:n vähennystä perusurasta. Voidaan arvioida, että ei-päästökauppa-sektorien päästöjen joustamattomuus on suurelta osin todellista, sillä näillä sektoreilla loppukulutus on valtaosin pääomavaltaista ja polttoainevalinnoiltaan jäykkää. Mallissa on kuitenkin varmasti myös osittain aliarvioitu joitakin substituutiomahdollisuuksia



Kuva 27. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt päästökauppaan kuulumattomilla sektoreilla tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030. Sektoreilla tehdään päästökaupan hintatasoa vastaavat rajoitustoimet.

Kuvassa 28 on esitetty vielä tarkemmin päästökaupan ulkopuolisten sektorien päästöjen muutokset eri skenaarioiden välillä vuonna 2030. Merkittävimmät päästöjen vähennykset saadaan aikaan kevyessä teollisuudessa, palveluissa (sis. F-kaasut) ja liikenteessä. Asumisen päästöissä ei juuri tapahdu nettomuutoksia. Esimerkiksi puupolttoaineiden lisäkäyttö lämmitykseen kasvattaa metaanipäästöjä, mikä supistaa päästöjen vähennystä.



Kuva 28. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt päästökauppaan kuulumattomilla sektoreilla tarkastelluissa skenaarioissa vuonna 2030. Sektoreilla tehdään päästökaupan hintatasoa vastaavat rajoitustoimet.

### 4.5.3 Päästökaupan tase

Jotta päästökauppa toimisi päästöjen vähentämisen kannalta mahdollisimman kustannustehokkaalla tavalla, eri sektoreilla päästöjen vähentämisen marginaalikustannusten tulisi olla yhtä suuria. Päästökauppaan kuulumattomille toimialoille asetettavat päästötavoitteet olisi tällöin asettava sellaiselle tasolle, että vähennysten rajakustannukset muodostuisivat näillä toimialoilla yhtä suuriksi kuin päästöoikeuksien hinta päästökauppasektoreilla. Päästöjen kokonaismäärän tulee olla korkeintaan Suomen kokonaispäästötavoite ostettujen päästöoikeuksien määrällä lisättynä tai myytyjen päästöoikeuksien määrällä vähennettynä.

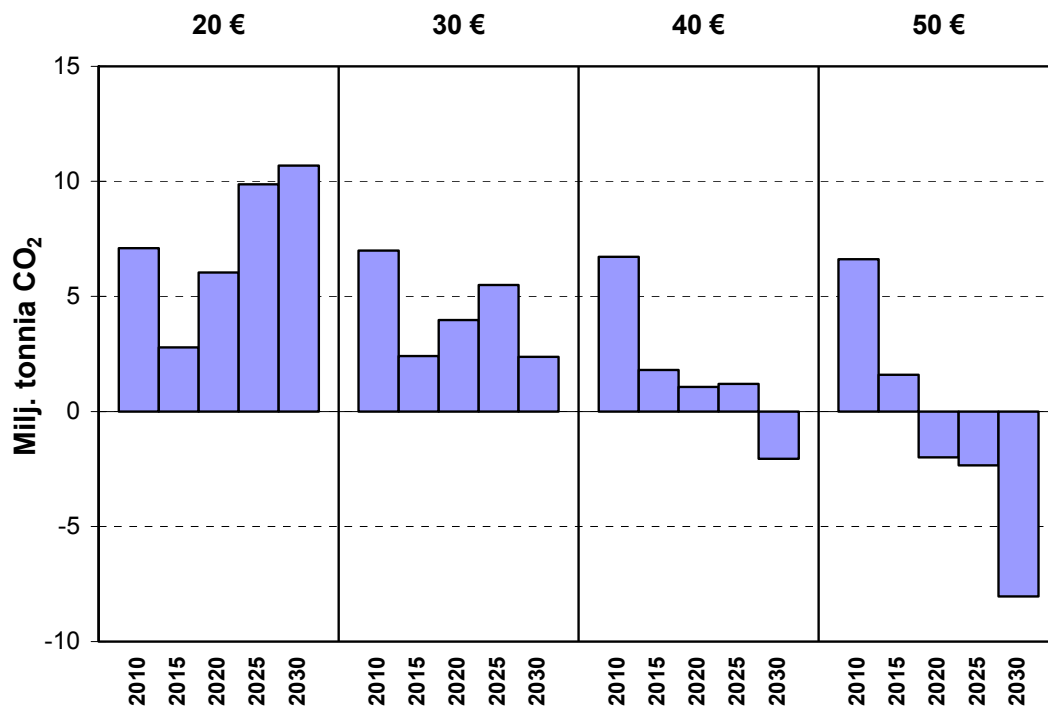
Päästökauppaan kuulumattomien sektorien tavoitekiintiöiden asettaminen kokonaiskustannusten kannalta edullisimmalla tavalla edellyttäisi kuitenkin tietoa päästöoikeuksien tulevista hinnoista. Lisäksi päästökaupan ulkopuolelle jäivät sektorit joutuisivat kärsimään päästökaupasta siinä tapauksessa, että päästökauppasektorien päästökaikiintiöt asetetaan liian pieniksi, jolloin päästöoikeuksien hinta nousee tavoitteiden kannalta liian suureksi.

Olettaen, että Suomen kokonaispäästötavoite on Kioton periodilla  $-0\%$ :n päästöjen vähennys, tulosten mukaan päästöjen kustannusoptimaaliset tavoitetasot jakaantuvat siten, että päästökaupan piiriin kuuluville sektoreille tulisi 34,2 miljoonaa tonnia ja päästökaupan ulkopuolisille sektoreille jäisi suunnilleen sama määrä, 36,2 miljoonaa tonnia. Tämä koskee tosin vain Kioton tavoitteessa pysyvää skenaariota, mutta optimaalisen jakauman erot eri vähennysskenaarioiden välillä ovat pieniä. Ei-päästökauppa-sektorille kohdistuva päästöjen optimaalinen vähennystavoite jää tulosten mukaan varsin pieneksi, vajaan 1 miljoonan tonnin määrään vuonna 2010. Komission päätöksen (4.7.2007) mukaan Suomen päästökauppa-sektorin päästökatto on 37,6 milj. t, mikä poikkeaa tämän työn teoreettisella laskentamallilla saadusta optimaalisesta määrästä 3,4 milj. t. Laskentamalli ottaa huomioon KTM:n skenaariossa oletetun rakenteellisen kehityksen, mutta ei mm. Kioton mekanismeilla hankittuja päästöoikeuksia. Suomen Kioton mekanismien osto-ohjelmassa arvioidaan hankittavan keskimäärin päästöoikeuksia 2,4 milj. t vuodessa Kioton kaudella.

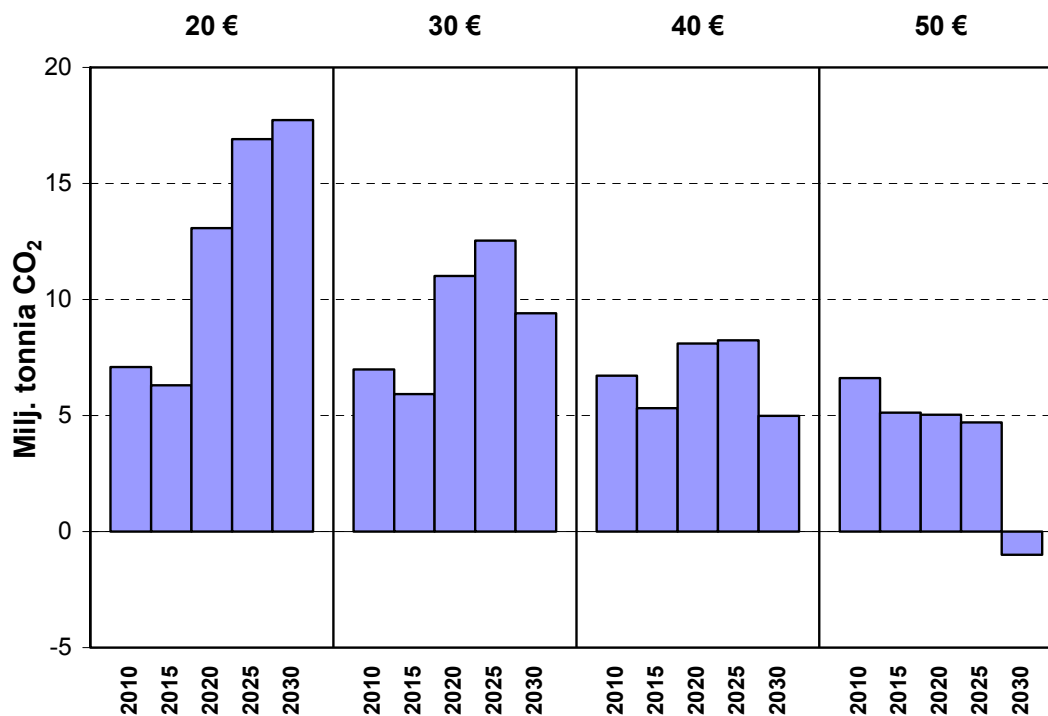
Päästöjen rajoitusskenaarioiden tulosten mukainen päästöoikeuksien kauppa on esitetty kuvassa 29. Alhaisempaan, 20 €/n hintaan perustuvan skenaarion tulosten mukaan Suomi olisi päästöoikeuksien netto-ostaja koko tarkasteluaikavälin 2005–2030. Kioton periodilla päästöoikeuksia kannattaisi ostaa noin 7 miljoonaa tonnia vuodessa. Mikäli päästötavoite tiukentuu oletusten mukaan Kioton periodin jälkeen asteittain, vuoden 2015 tilanteessa ostotarve vähenisi noin 2,5 miljoonaa tonniin, mutta se kasvaisi jälleen vuosina 2020–2030 6–11 miljoonaa tonniin vuodessa.

Korkeimman, 50 €/n päästöoikeuksien hinnan skenaariossa Suomi olisi Kioton periodin jälkeen vuosina 2015–2025 päästöoikeuksien kaupassa lähes tasapainossa, mutta vuonna 2030 päästöoikeuksia kannattaisi jo myydä lähes 8 miljoonaa tonnia, kun niistä saatu hinta tuolloin jo ylittäisi päästötavoitteen saavuttamisen marginaalikustannuksen. Eri teknologioita koskevien ennakointien mukaan mm. hiilidioksidin talteenoton ja loppusijoituksen kustannukset vähennettyä päästötonnia kohti alenevat vuoteen 2030 mennessä selvästi alle 50 €/t:n tason, joten kansainvälisen päästökaupan hintataso ei todennäköisesti pysykään niin korkealla tasolla vuonna 2030, ellei vähennystavoitteita kiristetä merkittävästi.

Jos Suomen päästörajoite vuonna 2020 on  $-20\%$  skenaariossa oletetun  $-10\%$  sijasta, Suomi joutuisi ostamaan päästöoikeuksia kaikissa tarkastelluissa päästöoikeuden hintaluokissa (20–50 €/tCO<sub>2</sub>) vuoden 2020 tasolla 7 miljoonaa tonnia lisää verrattuna kuvaan 29. Siis myöskään korkeimmalla hintatasolla Suomi ei olisi päästöoikeuksien myyjä vuonna 2020 (Kuva 30).



Kuva 29. Hiilidioksidin päästöoikeuksien kaupan nettotase Suomessa tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030 (vähennystavoitteet 10 % ja 20 % vuonna 2020 ja 2030).



Kuva 30. Hiilidioksidin päästöoikeuksien kaupan nettotase Suomessa tarkastelluissa skenaarioissa vuoteen 2030 (vähennystavoitteet 20 % ja 30 % vuonna 2020 ja 2030).



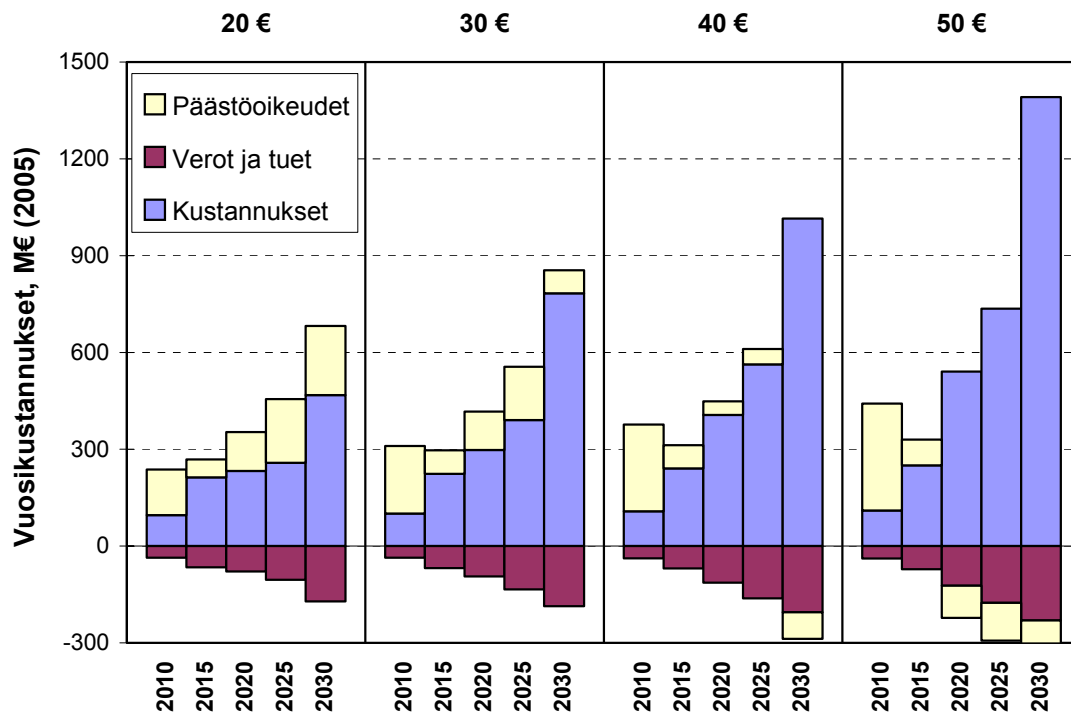
## 4.6 Päästöjen vähentämisen suorat kustannukset

Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen aiheuttamia suoria kustannuksia voidaan arvioida vertaamalla kunkin päästötavoitteita sisältävän skenaarion kustannuksia perusuraskenaarion kustannuksiin. Kuvassa 31 on esitetty suorat vuosittaiset lisäkustannukset tarkastellussa skenaariossa verrattuna perusuraan, kun oletetaan Suomen päästöjen vähennystavoitteeksi 10 % vuonna 2020 ja 20 % vuonna 2030. Vastaavasti kuvassa 32 on esitetty lisäkustannukset olettaen vähennystavoitteiksi 20 % vuonna 2020 ja 30 % vuonna 2030. Päästötavoitteita koskevat oletukset vaikuttavat ainoastaan tulosten mukaisen laskennallisen päästöoikeuksien kaupan kustannuksiin.

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. Tukien summa on tällöin vähennetty maksettujen verojen summasta.

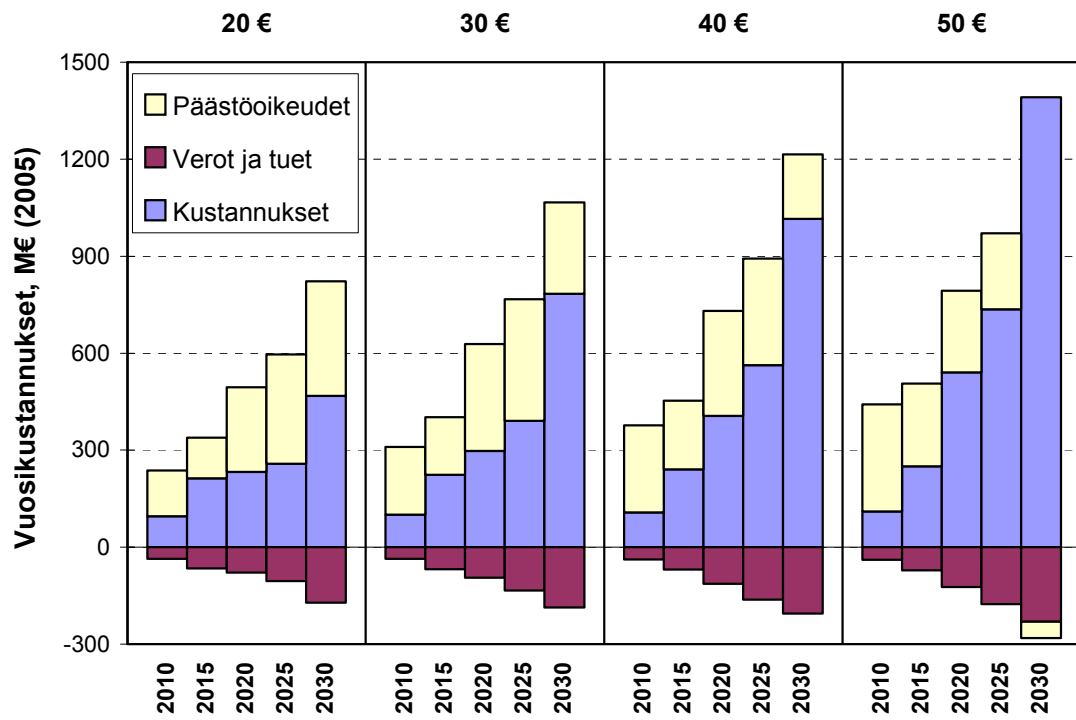
Lisäkustannukset luonnollisesti kasvavat sekä päästöoikeuden hinnan noustessa että päästötavoitteen kiristyessä. Suorat kustannukset ovat tulosten mukaan Kioton periodilla noin 240 miljoonaa euroa vuodessa, kun päästöoikeuden hinta on 20 €/t. Vuonna 2020 kustannukset ovat alimmillaan, 20 €/t:n hintatasolla, noin 350 milj. € ja vuonna 2030 noin 700 milj. €. Korkeimmillaan, 50 €/t:n hintatasolla, kustannukset olisivat vuonna 2020 noin 550 milj. € ja vuonna 2030 noin 1 400 milj. €. Pahimmassa tapauksessa kustannukset siis nousevat varsin rajusti vuoden 2010 tilanteesta vuoteen 2030 mennessä. Korkeimmalla hintatasolla ei tulosten mukaan kuitenkaan enää kannata ostaa päästöoikeuksia vuonna 2030, joten kustannukset olisivat siis itse asiassa vielä korkeammat, jos päästöoikeuksia ostettaisiin 50 €/t:n hinnalla vuonna 2030.

Jos Suomen päästörajoite vuonna 2020 on -20 % skenaariossa oletetun -10 % sijasta, Suomi joutuisi ostamaan päästöoikeuksia kaikissa tarkastelluissa päästöoikeuden hintaluokissa (20–50 €/tCO<sub>2</sub>) vuoden 2020 tasolla 7 miljoonaa tonnia lisää verrattuna kuvaan 29. Tästä aiheutuva vuotuinen lisäkustannus olisi kuvan 31 tuloksiin verrattuna 20 €/tCO<sub>2</sub> päästöoikeuden hinnan tapauksessa 140 milj. €, 30 €/t:n tapauksessa 210 milj. €, 40 €/t:n tapauksessa 280 milj. € ja 50 €/t:n tapauksessa 350 milj. euron lisäkustannus vuoden 2020 tasolla.



Kuva 31. Päästöjen rajoittamisen aiheuttamat suorat vuotuiset lisäkustannukset tarkastelluissa päästökauppaskenaarioissa vuoteen 2030 Suomessa (vähennystavoitteet 10 % ja 20 % vuonna 2020 ja 2030).

Päästökauppa sellaisenaan johtaa teoriassa Pareto-parannukseen, eli se joko vähentää kaikkien kaupan osapuolten kustannuksia tai pitää ne vähintään ennallaan. Käytännössä näin ei kuitenkaan välttämättä käy, sillä päästökauppa vaikuttaa välillisesti eri tuotteiden hintaan, erityisesti energiaintensiivisten tuotteiden ja sähkön ja lämmön hintaan. Niinpä sellaiset kaupan osapuolet, jotka ovat käyttäneet runsaasti esimerkiksi markkinasähköä, joutuvat päästökaupassa välillisesti maksamaan päästöoikeuksista, vaikka eivät tuottaisi lainkaan päästöjä. Tämä näkyy osaltaan tuloksissa sähkön nettotuonnin loppumisena.



Kuva 32. Päästöjen rajoittamisen aiheuttamat suorat vuotuiset lisäkustannukset tarkastelluissa päästökauppaskenaarioissa vuoteen 2030 Suomessa (vähennystavoitteet 20 % ja 30 % vuonna 2020 ja 2030).

## 5. Yhteenveto

Tutkimuksen ensimmäisessä osassa muodostettiin globaalilla TIMES-energiajärjestelmämallilla EU:ta koskevia skenaarioita, joissa EU vähentää 20 % kasvihuonekaasupäästöistään vuoteen 2020 ja 30 % vuoteen 2050 mennessä. Skenaariotarkastelun tehtävänä oli selvittää kustannusoptimaalisin tapa toteuttaa tarvittavat päästövähennykset sekä arvioida päästövähennysten vaikutuksia mm. energian kustannuksiin ja teollisuuden energiankäyttöön.

Selkeästi suurin osa EU:n päästövähennyksistä toteutettiin sähköntuotannossa, jonka päästöt laskevat 60 % baseline-skenaarioon nähden. Skenaariossa ei tehty uusia investointeja hiilivoimaan, ja poistuvaa kapasiteettia korvataan sekä kasvavaa kysyntää tyydytetään pääosin tuulivoimalla sekä bioenergialla; ydinvoiman suurempaa osuutta rajoittaa kasvava uraanin hinta. Sähkön kokonaiskulutus laskee vain noin 6 % verrattuna baseline-skenaarioon.

Teollisuudessa päästövähennykset ovat pienempiä, ja kivihiili pysyy sähkön ohella tärkeimpänä energiamuotona. Syynä kivihiilen vähäiseen korvautumiseen on osin mallin sisältämien vaihtoehtojen puute, osin maakaasun pienempi kustannusetu sähkösektoriin verrattuna. Liikenteen päästöt pienenevät vuoteen 2030 asti polttoainetehokkuuden paranemisen vuoksi mutta kääntyvät uudestaan kasvuun kysynnän noustessa. Muilla sektoreilla absoluuttiset vähennykset ovat pienempiä.

Mallin mukainen päästöjen marginaalihinta EU:ssa oli käytetystä talousskenaariosta riippuen 25–30 €/t vuonna 2020, jonka jälkeen hinta nousi maltillisesti vuoteen 2050 asti. Päästöoikeuksien hinta muodostaisi tällöin noin 60 % kivihiilen ja 25 % maakaasun käytön kustannuksista. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös mahdollisuutta toteuttaa CDM-hankkeita EU:n ulkopuolella sähkö- ja teollisuussektoreilla, jolloin vain noin 30 % päästövähennyksistä toteutettaisiin EU:n alueella ja päästöjen marginaalikustannus olisi 6–8 €/t. Sähkön hinnan arvioitiin kasvavan päästörajoitusten seurauksena noin kolmannekseen baseline-skenaarioon nähden. Energian loppukäytön hinnat nousivat eri sektoreilla keskimäärin 15 % baseline-skenaarioon verrattuna, teollisuudessa keskimäärin 26 % ja eri teollisuudenaloilla 10–40%. Päästövähennysten kokonaiskustannus oli 0,21 % BKT:stä vuonna 2020, koostuen kasvaneista investointi- ja käyttökustannuksista energiajärjestelmässä, vähentyneen kulutuksen aiheuttamasta kysynnän menetyksestä sekä pienentyneistä energian tuonti- ja tuotantokustannuksista.

Mallilla laskettiin EU:n päästövähennykset kahden eri talousskenaarion tapauksessa, joissa BKT:n kasvuennusteet olivat 2,4 % ja 1,4 % vuodessa. Pienemmän talouskasvun tapauksessa päästöjen marginaalikustannukset olivat noin neljänneksen pienemmät ja päästövähennykset suhteessa BKT:hen kasvoivat selkeästi hitaammin. Jos

EU:n yksipuolisen vuoden 2050 päästönvähennystavoitteen oletetaan tiukkenevan 30 prosentista 60 prosenttiin, nousee rajoittamisen marginaalikustannus tasolle 100 €/t, mikäli päästöoikeuksia ei hankita EU:n ulkopuolelta.

Saatuja tuloksia verrattiin muilla malleilla muodostettuihin arvioihin vastaavista päästövähennysskenaarioista, joissa marginaalikustannukset olivat pääpiirteittäin hieman TIMES-mallilla saatuja suurempia mutta kokonaiskustannukset pienempiä. Mallien tulosten välistä vertailua hankaloittavat kuitenkin erot mallien rakenteessa, tausta-oletuksissa ja kasvuennusteissa, kuten kahdesta eri talousskenaariosta saaduista tuloksista voidaan todeta.

**Suomea koskevat tarkastelut** perustuvat bruttokansantuotteen sektorikohtaisiin kehitysarvioihin, jotka saatiin kauppa- ja teollisuusministeriöltä (KTM) vuoden 2007 touko- ja heinäkuussa skenaariotyötä varten.

Tarkasteltavina skenaarioina ovat baseline eli perusuraskenaario sekä päästöjen rajoitusskenaariot, joissa oletetaan kansainvälinen päästökauppa ja Suomen kokonaispäästöjen vähennystavoitteeksi -0 % vuonna 2010, -10 % vuonna 2020 ja -20 % vuonna 2030 vuoden 1990 päästöihin verrattuna. Päästöoikeuksien kaupassa päästöoikeuksien hinnaksi oletetaan 20 €, 30 €, 40 € tai 50 € tonnilta (CO<sub>2</sub>-ekv.) vuosina 2016–2030. Vuoteen 2015 saakka oikeuksien hinnan oletetaan olevan kaikissa tapauksissa 20 € tonnilta. Laskelmista tehdään myös johtopäätöksiä, jotka koskevat tilannetta, jossa Suomen päästötavoite on -20 % vuonna 2020.

Primaarienergian kulutus pysähtyy kaikissa skenaarioissa vuosina 2010–2020. Kivihii- len käyttö lähtee vähenemään kaikissa päästönrajoitusskenaarioissa vuoden 2010 jäl- keen, ja toisaalta maakaasun käyttö kasvaa. Päästöjen rajoitusskenaarioissa öljyn kulu- tus vähenee jonkin verran perusurasta. Bioenergian hyödyntäminen kasvaa kokonais- energiataaseessa merkittävästi. Puupolttoaineita käytetään vuoteen 2030 mennessä 35–60 prosenttia enemmän kuin vuonna 2002, kun mustalipeää ei lasketa mukaan. Kaikissa päästöjen rajoitusskenaariossa jätettä hyödynnetään energiaksi huomattavasti runsaam- min kuin nykyisin. Myös tuulivoimaa hyödynnetään vuoteen 2025 mennessä tuntuvasti nykyistä enemmän.

Hiilidioksidin talteenotto ja loppusijoitus (CCS) tulee käyttöön 30 €:n hintatasosta alka- en, ensiksi tosin vain länsirannikolle (mm. Raahen terästehdas). Korkeimmalla hintata- solla CCS tulee käyttöön myös pääkaupunkiseudun maakaasukombivoimalaitoksissa.

Sekä uusien että vanhojen rakennusten ominaiskulutukset pienenevät. Vaikka sekä asuin- että palvelurakennuskannan oletetaan kasvavan merkittävästi, rakennusten läm- mitysenergian kokonaiskulutus pysyy skenaariotulosten mukaan suunnilleen aiemmalla

tasolla tai kääntyy jopa hienoiseen laskuun. Tulosten mukaan useimmissa skenaarioissa sekä kaukolämmityksen että maalämmön markkinaosuudet kasvavat selkeimmin vuoteen 2030 mennessä. Sähkölämmityksen markkinaosuuden kehitys (mukaan lukien lämpöpumppujen käyttämä sähkö) vaihtelee päästöoikeuksien hinnan mukaan siten, että pienimmilleen sen osuus laskee 30 €/t:n skenaariossa. Biopolttoaineiden markkinaosuus pysyy kaikissa skenaarioissa varsin vakaana.

Tulosten mukaan liikenteen biokomponenttien käytön lisääminen vähimmäistavoitetta nopeammin tulee päästöjen rajoitustoimena vähitellen yhä kannattavammaksi päästöoikeuksien hinnan noustessa. Jos biopolttoaineen voitaisiin olettaa olevan kokonaisuudessaan vakaan hintatason tuontien energiaa, kannattavuus nousisi vielä huomattavasti paremmaksi. Skenaarioissa oletettiin kuitenkin, että 50 % biokomponenteista on tuotettava Suomessa metsäpolttoaineesta. Biokomponenttien lisäkäyttö liikennepolttoaineissa vähentää siten skenaarioissa metsäpolttoaineen käyttöpotentiaalia muilla sektoreilla ja nostaa metsäpolttoaineen hintaa.

Uuden ydinvoimalaitoksen valmistumisen viivästymisen takia Kioton kaudella tarvitaan siis tulosten mukaan päästöjen vähennyksiä noin 16 miljoonaa tonnia vuodessa. Vuoden 2015 jälkeenkin suurin paine päästöjen lisäykseen on energian tuotannossa. Korkeampien päästöoikeuksien hintojen skenaarioissa päästöt sen sijaan alkavat vähentyä myös energian tuotannossa.

Kasvihuonekaasupäästöjen kehityksessä eri sektoreilla on varsin huomattavia eroja. Tällä on merkitystä erityisesti päästökaupan kannalta. Päästöjen suhteelliset muutokset ovat suurimpia erillisessä sähköntuotannossa. Tavanomaisiin polttoaineisiin perustuvan konventionaalisen lauhdevoiman tuotannon kannattavuus heikkenee sitä enemmän, mitä korkeammaksi päästöoikeuksien hinta nousee. Korkeilla hintatasoilla tuotanto vähenee Kioton kaudesta lähtien käytännössä minimitasolle eli vain huippu- ja varavoimaksi.

Kivuttomimmin päästöjä tulosten mukaan voidaan vähentää vuoden 1990 tasosta pienpoltton hiilidioksidipäästöistä ja metaanipäästöistä. Vuoteen 2015 mennessä uuden ydinvoimalaitoksen käyttöönotto on kuitenkin päästötavoitteiden saavuttamisen kannalta keskeisin yksittäinen toimi. Kioton kauden jälkeen mitään vastaavan suuruisiin päästönvähennyksiin johtavia, helposti kohdennettavia keinoja ei ole näköpiirissä. Metaanipäästöjä voidaan silti edelleen edullisesti vähentää jätehuollon kehittämisen keinoin. Toinen merkittävä ja kokonaistaloudellisesti edullinen yksittäinen päästöjen vähennyskohde on typpihapon valmistus, jossa N<sub>2</sub>O-päästöjä voidaan rajoittaa katalyyttisin menetelmin arviolta noin 80 %.

Tulosten mukaan 20 €/n ja 30 €/n päästöoikeuksien hinnalla Suomi olisi päästöoikeuksien netto-ostaja skenaarioiden koko tarkasteluajavälillä. Sen sijaan 40 €/n ja 50 €/n

hinnoilla suomalaisten yritysten kannattaisi tarkasteluaikavälin loppupuolella myös myydä päästöoikeuksia. Jos Suomen päästötavoitteeksi vuonna 2020 oletetaan -20 % skenaariossa tarkastellun -10 %:n sijasta, päästöoikeuksia jouduttaisiin ostamaan kaikilla hintatasoilla vastaavasti enemmän.

Yhteenvetona päästökaupan ulkopuolelle jäävien sektoreiden päästöjen muutoksista erilaisilla päästöjen vähennysten marginaalikustannusten tasoilla voidaan todeta, että näillä sektoreilla saavutettavat päästöjen vähennykset ovat varsin pieniä, mikä olisi syytä ottaa huomioon näille sektoreille kohdistettavia päästötavoitteita asetettaessa. Jos tavoitteet asetetaan liian tiukoiksi, voi niiden saavuttamiseksi tarvittavien toimien toteutus johtaa helposti suuriin lisäkustannuksiin. Toisaalta nämä kustannukset tulisivat pääosin kotimarkkinasektorin kannettaviksi, jolloin niiden taloudelliset kerrannaisvaikutukset jäävät pienemmiksi kuin päästökaupasektorille kohdistuvien kustannusten.

Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen aiheuttamia suoria kustannuksia voidaan arvioida vertaamalla kunkin päästötavoitteita sisältävän skenaarion kustannuksia perusraskenaarion kustannuksiin. Suorat kustannukset sisältävät kaikki energiajärjestelmässä kuvattujen tuotanto- ja käyttötekniikoiden investointi-, käyttö-, polttoaine- ja raaka-ainekustannukset sekä päästöoikeuksien kaupasta aiheutuvat kustannukset tai tuotot. Varsinaisten kustannusten lisäksi laskelmissa on mukana energiajärjestelmän eri toimijoiden maksamat energiaverot sekä niiden vastaanottamat tuet.

Lisäkustannukset luonnollisesti kasvavat sekä päästöoikeuden hinnan noustessa että päästötavoitteen kiristyessä. Suorat kustannukset ovat tulosten mukaan Kioton kaudella noin 240 miljoonaa euroa vuodessa, kun päästöoikeuden hinta on 20 €/t. Vuonna 2020 kustannukset ovat alimmillaan, 20 €/t:n hintatasolla, noin 350 mil. €, ja vuonna 2030 noin 700 milj. €. Korkeimmillaan, 50 €/t:n hintatasolla, kustannukset olisivat vuonna 2020 noin 550 milj. € ja vuonna 2030 noin 1 400 milj. €. Jos Suomen päästötavoitteeksi vuonna 2020 oletetaan -20 % skenaariossa tarkastellun -10 %:n sijasta, nousevat kustannukset vuoden 2020 tasolla 140–350 milj. € suuremmiksi kuin edellä on arvioitu, koska päästöoikeuksia joudutaan hankkimaan lisää Suomen ulkopuolelta.

## Lähdeluettelo

DEA 2005. *Technology Data for Electricity and Heat Generating Plants*. Danish Energy Agency, Elkraft & Eltra, March 2005.

EC 2007. *Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius, The way ahead for 2020 and beyond, Impact Assessment*; Commission of the European Communities, 2007 [http://europa.eu/press\\_room/presspacks/energy/comm2007\\_02\\_en.pdf](http://europa.eu/press_room/presspacks/energy/comm2007_02_en.pdf)

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

FPB 2006. *Post-2012 Climate Policy: Analysis of emissions reduction scenarios for 2020 and 2050*; Federaal Planbureau, Belgia, 2006, [http://www.climatechange.be/climat\\_klimaat/pdfs/EN-Post2012\\_Horiz20-50.pdf](http://www.climatechange.be/climat_klimaat/pdfs/EN-Post2012_Horiz20-50.pdf)

IEA 2004. *Prospects for CO<sub>2</sub> capture and storage*. Paris, International Energy Agency.

IEA 2005a. *CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion 1971–2003, 2005 Edition*. Paris, OECD/IEA.

IEA 2005b: *Projected Costs of Generating Electricity, 2005 Update*. Paris, International Energy Agency.

IEA 2006. *World Energy Outlook 2006*. Paris, International Energy Agency.

Kekkonen, V. & Pursiheimo, E. 2005. Selvitys sähkön tuontimahdollisuuksista Suomeen pohjoismaisilta sähkömarkkinoilta. VTT Working Papers 16. Espoo, VTT. 39 s. + liitt. 53 s.

Koljonen, T., Kekkonen, V., Lehtilä, A., Hongisto, M. & Savolainen, I. 2004. *Päästökaupan merkitys energiasektorille ja terästeollisuudelle Suomessa*. Espoo, VTT, VTT Tiedotteita 2259. 89 s. + liitt. 3 s.

Koljonen, T., Lehtilä, A. & Savolainen, I. 2006. *Global demand of the clean energy technology under developing climate policy*; GHGT-8 Conference in Trondheim, Norway. June 2006.

Koster, A., Matzner, H.D. & Nichol, D.R. 2003. PBMR design for the future, *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 222, Iss. 5–6.



KTM 2003. *Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003–2006*. Työryhmän ehdotus. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, työryhmä- ja toimikuntaraportteja 5/2003.

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 sopeutumisstrategia*. Helsinki: Maa- ja metsätalousministeriö, MMM:n julkaisuja 1/2005. 272 s.

Norden 2007. *Climate 2050, The road to 60-80 percent reductions in the emissions of greenhouse gases in the Nordic countries*. Nordic Council of Ministers, 2007 <http://norden.org/pub/miljo/miljo/sk/TN2007535.pdf>

OECD 2005. *Uranium 2005: Resources, production and demand*. Paris, OECD Nuclear Energy Agency ja International Atomic Energy Agency.

Rogner, H.-H. & McDonald, A. 2004. Nuclear Energy, *Die Zeitschrift der Energieverwertungagentur*. Nr. 1/2004.

Russ, P., Ciscar, J.C. & Szabó, L. 2005. *Analysis of Post-2012 Climate Policy Scenarios with Limited Participation*. DG JRC/IPTS, 2005.

Savolainen, I., Pipatti, R. & Lehtilä, A. 1998. *Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoitustavoitteiden jako EU-maiden kesken. Yhteenveto KTM:lle tehdyistä selvityksistä ja toimitetuista muistioista*. Tutkimusselostus ENE5/14/98, VTT Energia 1998.

Soimakallio, S., Savolainen, I. & Syri, S. 2004. *Triptyykki-taakanjakomallin arviointi – väliraportti*. VTT Prosessit, projektiraportti PRO3/P54/04. 9.12.2004.

Syri, S., Lehtilä, A., Savolainen, I. & Ekholm, T. 2007. *Global energy and emissions scenarios for effective climate change mitigation – deterministic and stochastic scenarios with the TIAM model*. Paper submitted to IJGHG.

Wallace, E. et al. 2006. From field to factory - Taking advantage of shop manufacturing for the pebble bed modular reactor. *Nuclear Engineering and Design* 236, Iss. 5–6, s. 445–453.

