



Tiina Koljonen, Johanna Pohjola, Antti Lehtilä,
Ilkka Savolainen, Esa Peltola, Martti Flyktman,
Markus Haavio, Matti Liski, Pertti Haaparanta,
Hanna-Mari Ahonen, Anna Laine &
Alec Estlander

Suomalaisen energiateknologian globaali kysyntä ilmastopolitiikan muuttuessa

Koljonen, Tiina, Pohjola, Johanna, Lehtilä, Antti, Savolainen, Ilkka, Flyktman, Martti, Peltola, Esa, Haavio, Markus, Liski, Matti, Haaparanta, Pertti, Ahonen, Hanna-Mari, Laine, Anna & Estlander, Alec. Suomalaisen energiategnologian globaali kysyntä ilmastopolitiikan muuttuessa [Global demand of Finnish clean energy technologies under developing climate policies]. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2448. 63 p. + app. 8 p.

Keywords climate policy, energy technology markets, future, modelling, financing, investments, global economy, regional economy, clean energy technologies, scenarios, energy systems, energy services

Abstract

The future climate policies will be the main driver in future energy technology markets. Tackling climate change would require the transition to nearby zero emission energy systems, which would cause costs for the national economies. In this report the demand of Finnish clean energy technologies were evaluated with scenario analysis. The models used were global economy models GTAP and RICE and the Global TIMES energy system model. Also future financing mechanisms promoting investments in clean energy technologies, like JI- and CDM-mechanisms, were investigated.

The starting point of the scenario analysis was the EU's 2 degree C target. The macroeconomic costs of climate policies were low in our calculations, which is in line with other studies. In 2050 the GDP loss would account to less than 1% compared to the Baseline scenario. According to the Global TIMES scenarios, the global primary energy use likewise emissions would nearby double without climate policies. Approximately 60% of energy investments would go to the developing countries, where the investments need to cover the increasing energy demand alone would require hundreds of millions or even billions of euros of investment money. The existing project based CDM is able to realize a minor part of the emission reduction potential in the developing countries. The scope of the future CDM should therefore be extended remarkably. In the policy scenarios, most of the investments were based on bioenergy technologies and wind power. After 2020 the investments in CO₂ capture and storage increased also substantially in our calculations.

Alkusanat

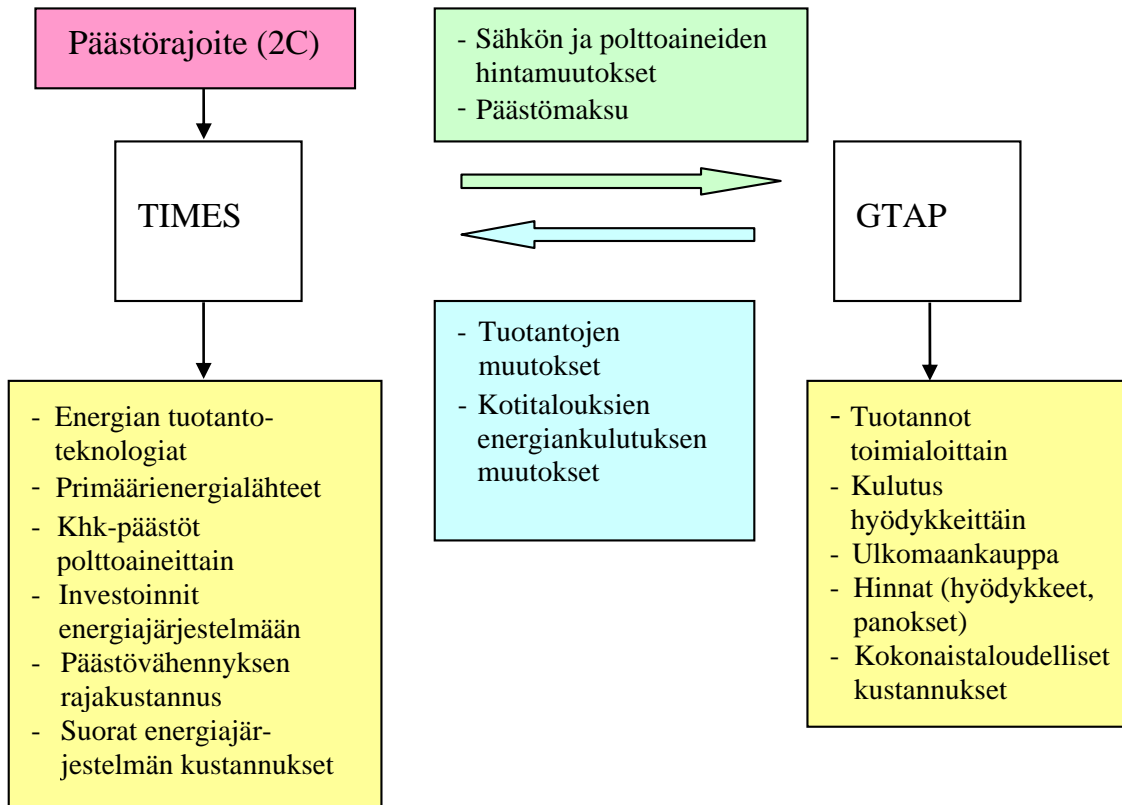
Julkaisussa esitetään yhteenveto hankkeen ”Suomalaisen energiateknologian kysyntä ja kansainväliset liiketoimintamahdollisuudet ilmastopolitiikan muuttuessa – SETELI” tuloksista. Tutkimuksessa tarkasteltiin globaalin ilmastopolitiikan vaikutuksia globaaliin ja alueelliseen talouteen, energiainvestointeihin sekä rahoitusmekanismeihin, joiden avulla voitaisiin edistää vähäpäästöisen ja energiatehokkaan energiateknologian vientiä.

Tutkimus tehtiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT), Helsingin kauppakorkeakoulun (HSE) sekä Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) yhteishankkeena ja koordinaattorina toimi VTT. Tutkimus oli osa Tekesin Climbus-ohjelmaa, ja sitä rahoittivat Tekesin lisäksi Metso Power Oy, Teknologiateollisuus ry, ulkoasiainministeriö, ÅF-Enprima ja VTT. Yhteishankkeen koordinaattorina ja vastuullisena johtajana toimi tutkimusprofessori Ilkka Savolainen ja projektipäällikkönä erikoistutkija Tiina Koljonen VTT:ltä. HSE:n osahankkeen vastuullisena johtajana toimi professori Pertti Haaparanta ja SYKEN osahankkeen vastuullisena johtajana yksikönpäällikkö Alec Estlander. Tutkimustyöhön osallistuivat VTT:ltä lisäksi erikoistutkijat Antti Lehtilä (globaalit energiajärjestelmätarkastelut Global TIMES -mallilla), Esa Peltola (globaalit tuulivoimapotentiaalit) ja Hidde Ronde (energiainvestoinnit Aasiassa) sekä tutkijat Martti Flyktman (globaalit bioenergiapotentiaalit) ja Eemeli Tsupari (energiateknologioiden kehitysarviot). HSE:sta tutkimustyöhön osallistuivat tutkijat Johanna Pohjola (globaalit kokonaistalousarviot GTAP-mallilla, taloudellisten laskelmien raportointi) ja Markus Haavio (nyk. Suomen Pankki, globaalit kokonaistalousarviot RICE-mallilla) sekä professori Matti Liski (globaalien kokonaistalousarvioiden vertailu, Sternin raportti). SYKE:stä tutkimustyöhön osallistuivat tutkijat Hanna-Mari Ahonen (nyk. Green Stream Network, JI- ja CDM-mekanismien kehityspolut), Anna Laine (JI- ja CDM-hankkeiden kehitys) ja Kari Hämekoski (nyk. Maailmanpankki, JI- ja CDM-hankkeiden kehitys). Projektin johtoryhmän puheenjohtajana toimi Pekka Järvinen (ÅF). Johtoryhmään kuuluivat lisäksi Tekesistä Teija Lahti-Nuuttila (vuosi 2005) ja Marjatta Aarniala (2006–2007), Matti Rautanen (Metso Power), Timo Airaksinen (Teknologiateollisuus), Hannu Eerola (ulkoasiainministeriö), Alec Estlander (SYKE), Pertti Haaparanta (HSE), Ilkka Savolainen (VTT) ja Tiina Koljonen (siht., VTT).

Tiina Koljonen

pääsääntöisesti melko vähäiseksi, useampaan iterointiin ei kuitenkaan ollut tarvetta. Mallien yhteensovittamista tarkastellaan yksityiskohtaisemmin julkaisussa Pohjola (2008).

Global TIMES - GTAP -mallikehikon lisäksi GTAP-mallia käytettiin perinteisellä tavalla arvioitaessa globaalien päästömaksun suuruutta. Näissä laskelmissa päästövähennysten määrät vastaavat RICE-mallin arvioita päästövähennystarpeesta ko. periodilla.



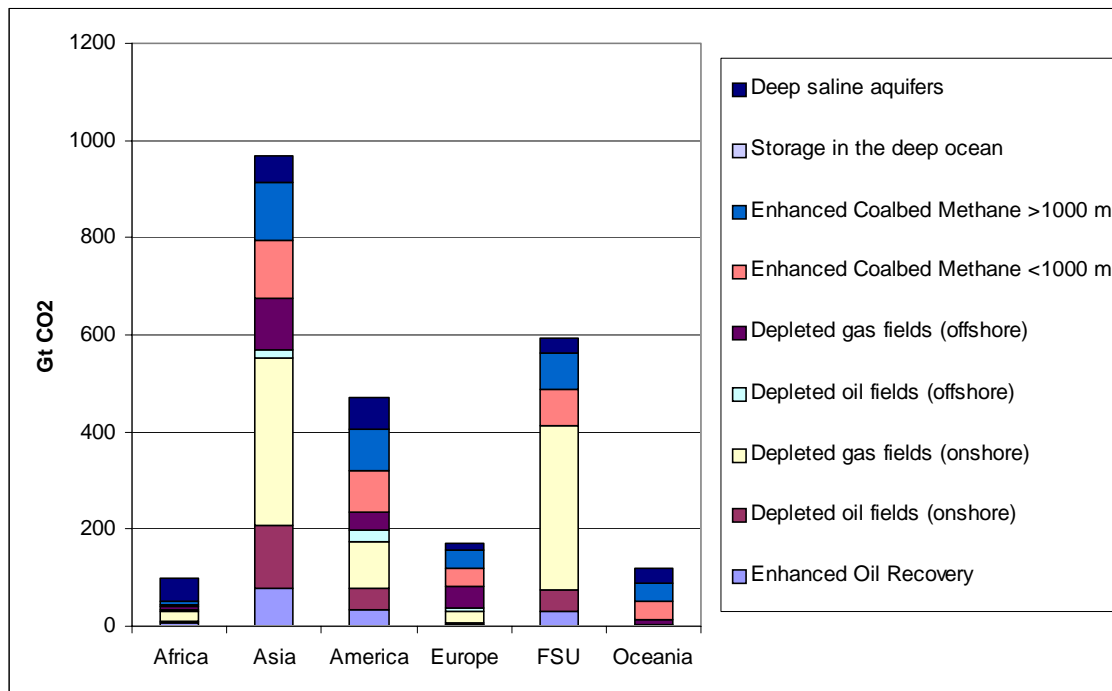
Kuva 3. Periaatekuva GTAP- ja TIMES-mallien yhteensovittamisesta.

2.2 Baseline- ja politiikkaskenaariot

Skenaariotarkasteluissa keskeisiä tekijöitä ovat muun muassa talouden ja energian kysynnän alueelliset kasvut, primäärienergiaresurssit ja niiden markkinahinta, kansainvälisen ilmastopolitiikan kehittyminen sekä energiateknologioiden kehitys. Energiateknologioiden kysyntätarkasteluissa laskentavuosiksi valittiin vuodet 2020 ja 2030 ja 2050. Ilmastopolitiikkaskenaarioissa tarkastelujakso on aina vuoteen 2100 asti, koska ilmastolliset ilmiöt ovat hyvin hitaita. Hiilidioksidin poistuminen ilmakehästä tapahtuu noin 100–200 vuoden aikavakioilla, joten tarkasteltaessa ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksien muutoksia tarvitaan hyvin pitkä aikajakso laskennassa.

2.4.4 Hiilidioksidin loppusijoituspotentiaali

Ilmastonmuutoksen hillinnässä hiilidioksidin erotuksella ja pitkäaikaisella varastoinnilla on arvioitu olevan merkittävä rooli tulevaisuudessa. CO₂:ta voidaan varastoida geologisiin muodostelmiin, kuten vanhoihin öljy- ja kaasulähteisiin, suolavesikerrostumiin tai kivihiilikerrostumiin. Lisäksi maailmalla on tutkittu CO₂:n varastointia valtamerien syvänteisiin, vaikka siihen liittyy merkittäviä ekologisia epävarmuustekijöitä. Varastointipotentiaaleista on esitetty kirjallisuudessa hyvin karkeita globaaleja arvioita, ja alueellisella tasolla tietoa ei välttämättä ole lainkaan saatavissa. Ainoastaan Euroopan, Pohjois-Amerikan ja Australian mannerten geologisten muodostelmien varastointipotentiaalit tunnetaan hieman paremmin lukuun ottamatta varastointia suolavesikerrostumiin. Skenaariolaskelmissa ei oletettu tapahtuvan varastointia valtameriin. Kuvassa 7 esitetään TIMES-skenaarioissa oletetut varastointipotentiaalit. Oletettu globaali kokonaisvarastointipotentiaali oli noin 2 400 Gt CO₂. Kirjallisuudessa esitetyt vastaavat potentiaaliarvot ovat yleisesti 500–5 000 Gt CO₂. Suurin epävarmuus liittyy varastointiin suolavesikerrostumiin. Kivihiilikerrostumiin varastoinnin osittain epäonnistuneet demonstraatiot ovat myös herättäneet epäilyksiä kyseisen varastoinnin mahdollisuuksista tulevaisuudessa.

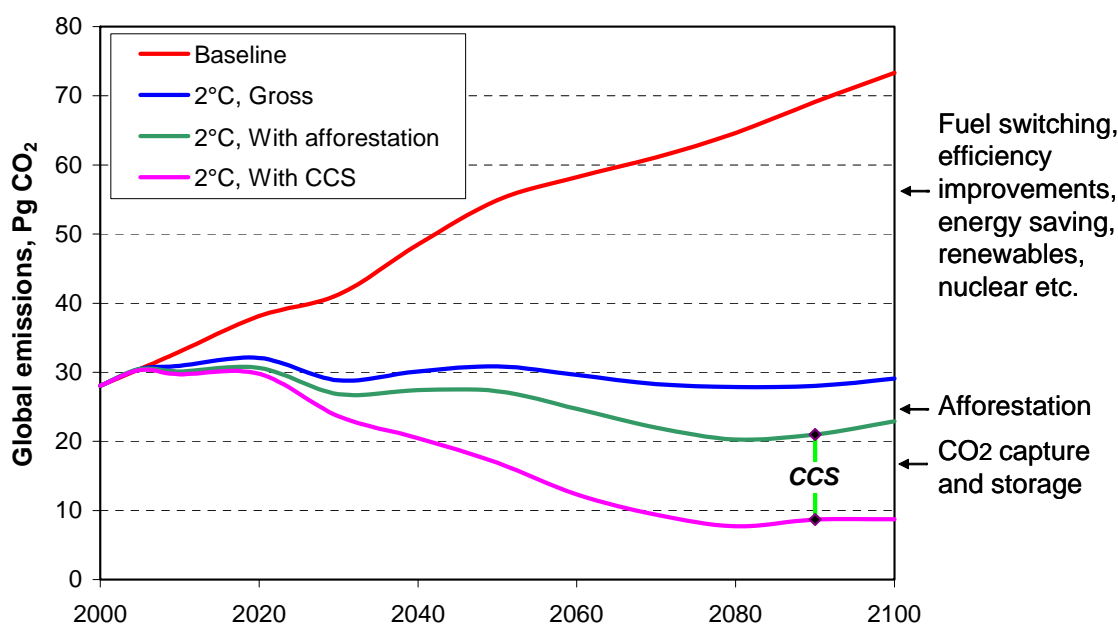


Kuva 7. TIMES-laskelmissa oletettu CO₂:n varastointipotentiaali eri maantieteellisillä alueilla.

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Ilmastopolitiikan vaikutukset globaaliin ja alueellisiin energiajärjestelmiin

Global TIMES -skenaariotulosten mukaan kahden asteen tavoitteen saavuttaminen edellyttäisi khk-päästöjen vähentämistä noin kolmannekseen nykyisestä tasosta (vrt. kuva 10). Suurin osa khk-päästöjen vähennysinvestoinneista liittyy energiatehokkuuden lisäämiseen ja siirtymiseen vähäpäästöisiin energiatuotantomuotoihin. Sekä metsityksellä että hiilidioksidin erotuksella ja varastoinnilla (CCS) on myös merkittävä rooli khk-päästövähennystavoitteen saavuttamisessa. Baseline-skenaarioon nähden päästöjen vähentäminen tulisi aloittaa heti, ja viimeistään vuoden 2020 jälkeen khk-päästöjen tulisi kääntyä selvään laskuun. Liitteessä A esitetään Baseline-skenaarion päästöt hiilidioksidille, metaanille, dityppioksidille ja fluorikaasuille. Liitteessä A esitetään myös ilmakehän lämpötilan nousu sekä CO₂-päästöjen alueellinen jakautuminen Baseline- ja politiikkaskenaarioissa.



Kuva 10. Globaalit CO₂-päästöt Baseline- ja 2 °C:n politiikkaskenaariossa.

Kuvissa 11 ja 12 esitetään globaalit primäärienergian kulutukset sekä globaali sähkön-
tuotanto Baseline ja 2 °C -politiikkaskenaarioissa. Kuvassa 13 esitetään herkkyystarkas-
telu 2 °C:n politiikkaskenaariolle. Herkkyystarkasteluissa pienennettiin oletettua alueel-
lista tuuli- ja bioenergiapotentiaalia 40 prosenttia. Liitteessä A esitetään lisäksi loppu-
käyttöenergian kulutus alueittain sekä herkkyystarkastelut globaalille ja Länsi-Euroopan
sähkön-
tuotantoskenaarioille, joissa on vähennetty edellä mainittua uusiutuvan energian
potentiaalia 40 prosenttia tai CO₂:n loppusijoituspotentiaalia 50 prosenttia. Yhdessä

Alkusanat

Julkaisussa esitetään yhteenveto hankkeen ”Suomalaisen energiateknologian kysyntä ja kansainväliset liiketoimintamahdollisuudet ilmastopolitiikan muuttuessa – SETELI” tuloksista. Tutkimuksessa tarkasteltiin globaalin ilmastopolitiikan vaikutuksia globaaliin ja alueelliseen talouteen, energiainvestointeihin sekä rahoitusmekanismeihin, joiden avulla voitaisiin edistää vähäpäästöisen ja energiatehokkaan energiateknologian vientiä.

Tutkimus tehtiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT), Helsingin kauppakorkeakoulun (HSE) sekä Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) yhteishankkeena ja koordinaattorina toimi VTT. Tutkimus oli osa Tekesin Climbus-ohjelmaa, ja sitä rahoittivat Tekesin lisäksi Metso Power Oy, Teknologiateollisuus ry, ulkoasiainministeriö, ÅF-Enprima ja VTT. Yhteishankkeen koordinaattorina ja vastuullisena johtajana toimi tutkimusprofessori Ilkka Savolainen ja projektipäällikkönä erikoistutkija Tiina Koljonen VTT:ltä. HSE:n osahankkeen vastuullisena johtajana toimi professori Pertti Haaparanta ja SYKEN osahankkeen vastuullisena johtajana yksikönpäällikkö Alec Estlander. Tutkimustyöhön osallistuivat VTT:ltä lisäksi erikoistutkijat Antti Lehtilä (globaalit energiajärjestelmätarkastelut Global TIMES -mallilla), Esa Peltola (globaalit tuulivoimapotentiaalit) ja Hidde Ronde (energiainvestoinnit Aasiassa) sekä tutkijat Martti Flyktman (globaalit bioenergiapotentiaalit) ja Eemeli Tsupari (energiateknologioiden kehitysarviot). HSE:sta tutkimustyöhön osallistuivat tutkijat Johanna Pohjola (globaalit kokonaistalousarviot GTAP-mallilla, taloudellisten laskelmien raportointi) ja Markus Haavio (nyk. Suomen Pankki, globaalit kokonaistalousarviot RICE-mallilla) sekä professori Matti Liski (globaalien kokonaistalousarvioiden vertailu, Sternin raportti). SYKE:stä tutkimustyöhön osallistuivat tutkijat Hanna-Mari Ahonen (nyk. Green Stream Network, JI- ja CDM-mekanismien kehityspolut), Anna Laine (JI- ja CDM-hankkeiden kehitys) ja Kari Hämekoski (nyk. Maailmanpankki, JI- ja CDM-hankkeiden kehitys). Projektin johtoryhmän puheenjohtajana toimi Pekka Järvinen (ÅF). Johtoryhmään kuuluivat lisäksi Tekesistä Teija Lahti-Nuuttila (vuosi 2005) ja Marjatta Aarniala (2006–2007), Matti Rautanen (Metso Power), Timo Airaksinen (Teknologiateollisuus), Hannu Eerola (ulkoasiainministeriö), Alec Estlander (SYKE), Pertti Haaparanta (HSE), Ilkka Savolainen (VTT) ja Tiina Koljonen (siht., VTT).

Tiina Koljonen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Symboliluettelo.....	8
1. Johdanto	9
2. Globaalien ja alueellisten skenaarioiden lähtökohdat ja tarkasteluissa käytetyt mallit ..	12
2.1 Skenaariotarkasteluissa käytetyt mallit ja niiden yhteensovittaminen	12
2.1.1 Mallien ominaisuudet ja päästövähennyskeinot.....	12
2.1.2 Global TIMES -mallin kuvaus	13
2.1.3 RICE-mallin kuvaus.....	17
2.1.4 GTAP-mallin kuvaus	18
2.1.5 Mallien yhteensovittaminen	19
2.2 Baseline- ja politiikkaskenaariot	20
2.2.1 Baseline	21
2.2.2 Politiikkaskenaariot.....	22
2.3 Kokonaistaloudelliset tarkastelut.....	22
2.3.1 RICE-skenaariot.....	22
2.3.2 GTAP-mallin aineisto ja parametrit	23
2.4 Energijärjestelmätarkastelut	24
2.4.1 Fossiiliset energiaressit	24
2.4.2 Bioenergiaressit.....	26
2.4.3 Tuulienergiapotentiaalit	27
2.4.4 Hiilidioksidin loppusijoituspotentiaali	29
2.4.5 Teknologiaskenaariot	30
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu	32
3.1 Ilmastopolitiikan vaikutukset globaaliin ja alueellisiin energijärjestelmiin	32
3.1.1 Integroidun GTAP-TIMES-tarkastelun tulokset.....	35
3.2 Ilmastopolitiikan vaikutus globaaliin ja alueelliseen talouteen.....	37
3.2.1 Päästövähennykset ja päästömaksu.....	37
3.2.2 Vaikutukset bruttokansantuotteeseen.....	38
3.2.3 Vaikutukset sektorikohtaisiin tuotantoihin	41
3.3 Skenaariotulosten vertailu ja merkittävimmät epävarmuudet	43

4.	Suomalaisen puhtaan energiateknologian ja -palveluiden kysyntä	46
4.1	Arviot suomalaisen puhtaan energiateknologian kysynnästä tulevaisuudessa ...	47
4.1.1	Investoinnit teknologioihin Global TIMES -skenaarioissa.....	47
4.1.2	CDM- ja JI-hankkeet.....	50
4.2	Palveluiden kysyntä.....	51
4.3	Rahoitusratkaisut	52
4.3.1	Tulevaisuuden JI- ja CDM-politiikka	52
4.3.2	Muut rahoitusratkaisut	55
5.	Johtopäätökset ja jatkotyö.....	56
	Lähdeluettelo	59
	Liitteet	
	Liite A: Global Times -skenaariotuloksia	
	Liite B: GTAP-mallilaskelmissa käytetyt Global TIMES -mallin tuottamat sähkön hintamuutokset vuosina 2020, 2030 ja 2050	

Symboliluettelo

Baseline	Työssä oletettu perusura l. perusskenaario, jossa lähtökohtana on nykyinen ilmastopolitiikka, YK:n väestönkasvuennusteet sekä Global Times ja RICE-mallien tietokantojen talouskasvuennusteet
BKT	Bruttokansantuote
CDM	Clean Development Mechanism l. puhtaan kehityksen mekanismi
CO ₂ e	Hiilidioksidiekvivalentti
EJ	Eksajoule l. 1×10^{15} J
ETSAP	IEA:n ohjelma Energy Technology Systems Analysis Programme
Gb	Gigabarreli
GTAP	Gloaali kokonaistaloudellinen malli, joka on kehitetty osana Global Trade Analysis -projektia
GTAP-E	Ilmastopolitiikkalaskelmia varten kehitetty GTAP-versio
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change l. hallitusten välinen ilmastopaneeli
JI	Joint Development Mechanism l. yhteistoteutus
khk	Kasvihuonekaasu
ppm	Part per million l. 0,000001 g
RICE	Regional dynamic Integrated model of Climate and Economy l. talouden ja ilmaston kuvaukset yhdistävä globaali intertemporaalinen malli
SRES	IPCC:n julkaisemien energia- ja päästöskenaarioiden nimi (story line)
TIAM	Gloaali energiajärjestelmämalli, joka on kehitetty IEA:n ETSAP-ohjelmassa
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM System l. IEA:n ETSAP-ohjelmassa kehitetty energiajärjestelmien mallinnusjärjestelmä
UNFCCC	The United Nations Framework Convention on Climate Change

1. Johdanto

YK:n ilmastosopimuksen (The United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) perimmäinen tavoite on vakauttaa ilmakehän kasvihuonekaasujen (khk) pitoisuus tasolle, joka ehkäisee ihmisen aiheuttamat vaaralliset muutokset ilmastojärjestelmälle. Tämä tavoitepitoisuus tulisi saavuttaa riittävän nopeasti, jotta ekosysteemi pystyy luonnollisesti sopeutumaan ilmastomuutokseen, ja ilman, että ruoan tuotanto on uhattuna, sekä mahdollistaen myös talouden kestävä kehityksen. Viimeiseen kohtaan sisältyy ilmastopolitiikan keskeinen kulmakivi: ilmastomuutoksen hillinnän kustannukset vaikuttavat negatiivisesti talouden kasvuodotuksiin ja toisaalta ilman mittavia investointeja ei edistetä kestävä kehitystä. Vuonna 2006 julkaistu ns. Sternin raportti (Stern 2007) avasi lisäksi laajan keskustelun itse ilmastomuutoksen aiheuttamista maailmantalouden kustannuksista. Raportin keskeinen johtopäätös oli, että ”voimakkaan ja nopean toimimisen tuomat hyödyt ovat merkittävästi suuremmat kuin kustannukset”. Kokonaistalousmallien tulosten perusteella kasvihuoneilmiön huomiotta jättäminen tulisi pienentämään vuoteen 2050 mennessä 5–20 prosenttia maailman bruttokansantuotetta (BKT) verrattuna siihen, mitä se olisi ilman ilmastomuutoksen aiheuttamia haittoja. Sen sijaan ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vakauttaminen tasolle 500–550 ppm CO₂e aiheuttaisi noin yhden prosentin vähennyksen bruttokansantuotteessa edellyttäen, että toimenpiteet aloitetaan heti.

Koska ilmastomuutoksen ja sen vaikutusten arviointiin liittyy hyvin merkittäviä epävarmuustekijöitä, hyväksyttävää kasvihuonekaasujen pitoisuustasoa on käytännössä mahdotonta määrittää. Kansainvälisessä poliittisessa päätöksenteossa joudutaankin arvioimaan toisaalta ilmastomuutokseen hillintään sekä sopeutumiseen liittyviä mahdollisuuksia ja kustannuksia sekä toisaalta ilmastomuutoksen ja sen hillinnän tuomia sosioekonomisia haittoja ja hyötyjä. Euroopan Unioni (EU) on asettanut ilmastomuutoksen hillinnän sen keskeisimmäksi ilmastopoliittiseksi tavoitteeksi. Komissio ehdottaa tiedonannossaan *Energiapolitiikka Euroopalle* (KOM 2007a) energiapolitiikan strategista tavoitetta, jonka mukaan EU vähentää vuoteen 2020 mennessä kasvihuonekaasupäästöjään vähintään 20 prosenttia vuoden 1990 tasosta tavalla, joka sopii yhteen sen kilpailukykytavoitteiden kanssa. Eurooppaneuvoston kokouksessa maaliskuussa 2007 päätettiin lisäksi, että EU olisi valmis vähentämään khk-päästöjään 30 prosenttia, jos muut teollisuusmaat ovat valmiit vähentämään päästöjään vastaavilla panoksilla. Lisäksi komission tiedonannossa *Maailmanlaajuisen ilmastomuutoksen rajoittaminen kahteen celsiusasteeseen – Toimet vuoteen 2020 ja sen jälkeen* (KOM 2007b) todetaan, että maailmanlaajuisia kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä vuoteen 2050 mennessä 50 prosenttia vuoden 1990 tasoon verrattuna, mikä edellyttää teollisuusmailta 60–80 prosentin päästövähennyksiä vuoteen 2050 mennessä.

Hallitustenvälinen ilmastopaneeli (IPCC 2007) on arvioinut, että lämpötilannousun rajoittaminen kahden asteen tasolle verrattuna esiteolliseen aikaan vaatisi maailman kasvihuonekaasujen päästöjen kääntämistä laskuun jo aivan lähivuosina ja päästöjen tulisi olla alle nykytason 50–85 prosenttia vuonna 2050. EU:n kahden asteen tavoitetta vastaava ilmakehän pitoisuustaso on IPCC:n ns. parhaan arvion mukaan noin 450 ppm CO₂e, siis selvästi alempi kuin Sternin raportin tarkastelema taso. Maapallon tasapainolämpötilan ja pitoisuuden välinen riippuvuus tunnetaan kuitenkin heikosti, kahden asteen nousua vastaava pitoisuustaso on IPCC:n tulosten mukaan todennäköisesti 370–540 ppm CO₂e.

Ilmastopimuksen osana on tehty kehittyneiden maiden päästöjä rajoittava ns. Kioton pöytäkirja. Se rajoittaa päästöjä vuosina 2008–2012, joskin taloudellisesti ja päästöjen kannalta merkittävin kehittynyt maa, Yhdysvallat, ei sitoutunut Kioton pöytäkirjaan. Kehittyneitä maita koskevien rajoitusten lisäksi pöytäkirja sisältää ns. mekanismeja, joilla pyritään edistämään päästöjen rajoittamisen kustannustehokkuutta. Näitä ovat kehittyneiden maiden välinen valtiotason päästökauppa ja näiden maiden välinen projektikohtainen päästöoikeuksien siirto eli yhteistoteutus (Joint Implementation, JI) sekä kehittyneiden maiden ja kehitysmaiden välinen projektikohtainen päästöoikeuksien siirto, puhtaan kehityksen mekanismi (Clean Development Mechanism, CDM). Viimeksi mainittu on osoittautunut varsin merkittäväksi tavaksi kytkeä kehitysmaat mukaan päästöjen rajoittamiseen ja myös ilmeisesti päästöjen rajoittamisen kustannustehokkuuden parantamiseen. Puhtaan kehityksen mekanismia ollaan laajentamassa eri tavoin, jotta päästöjen rajoittamisen kustannustehokkuus yhä paranisi.

Ilmastopimuksen osapuolten kokouksessa Balilla joulukuussa 2007 sovittiin neuvottelujen käynnistämisestä uuden päästörajoituspöytäkirjan aikaansaamiseksi (ns. Balin toimintasuunnitelma). Neuvotteluissa ovat mukana kaikki ilmastopimuksen maat, myös Yhdysvallat. Toimintasuunnitelmaan on kirjattu, että kehitysmaita koskevissa velvoitteissa otetaan huomioon kestävä kehitys, ts. niiden voimakas taloudellinen kasvu tunnustetaan lähtökohdaksi (mitä muutakaan voitaisiin tehdä). Kustannustehokkuuden edistäminen, kuten markkinamekanismien käyttö, tuodaan myös esille. Toimintasuunnitelmassa on tavoitteena saada uusi päästörajoituspöytäkirja valmiiksi neuvotelluksi jo vuonna 2009, jolloin olisi mahdollista saada se voimaan jopa vuoden 2012 jälkeen.

Maailman väestö ja talous kasvavat etenkin kehittyvissä maissa samoin kuin energian kysyntä. Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen samanaikaisesti edellä mainittujen kasvavien tekijöiden kanssa on erittäin haastava tehtävä ja päästöjen rajoittaminen tulisi toteutuessaan mullistamaan maailman energiajärjestelmän. Uudelle tehokkaalle ja vähäpäästöiselle energiantuotantoteknologialle tulee hyvin suuri kysyntä samoin kuin teknologialle, jolla tuotetaan energiapalvelut käyttäen energiaa hyvin säästeliäästi. International Energy Agency (IEA) on arvioinut Energy Technology Perspectives

-raportissaan (IEA 2006) tarkastelemassaan skenaariossa, että lähes puolet päästöjen vähennyksistä saavutetaan energian loppukäytön tehostamistoimilla. Kaiken kaikkiaan, jos kasvihuonekaasujen päästöjä vähennetään voimakkaasti, satojen miljardien vuosittaiset investoinnit energiateknologiaan siirtyvät vähitellen fossiilisia polttoaineita käyttävistä teknologioista uusiin, tehokkaisiin ja vähäpäästöisiin teknologioihin sekä energian käytön tehostamiseen.

Ilmastonmuutoksen hillintä tuo lähivuosina ja -vuosikymmeninä valtavan muutoksen energijärjestelmiin ja puhtaan energiateknologian kysyntään. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida, miten kysyntä kansainvälisen ilmastopolitiikan kehittyessä tulee kohdistumaan eri energiateknologioihin ja eri maantieteellisiin alueisiin ja minkälaisia liiketoimintamahdollisuuksia tämä avaa suomalaisille toimijoille. Toimintaympäristön muuttumista tulevaisuudessa ja sen vaikutuksia energiateknologioiden ja -palveluiden kehittämistarpeisiin sekä globaaliin liiketoimintapotentiaaliin on arvioitu skenaarioanalyysillä globaaleilla kokonaistalousmalleilla (GTAP ja RICE) sekä globaalilla energijärjestelmämallilla (ETSAP TIAM -versio Global TIMES -mallista). Luvussa 2 kuvataan tarkasteluissa käytetyt mallit sekä skenaarioiden lähtökohdat. Luvussa 3 esitetään skenaarioiden tulokset, ja luvussa 4 arvioidaan ilmastopolitiikan vaikutuksia energiateknologioiden kysyntään globaalisti ja alueellisesti. Luvussa 5 esitetään johtopäätökset sekä SETELI-hankkeen jatkotyö SEKKI.

2. Globaalien ja alueellisten skenaarioiden lähtökohdat ja tarkasteluissa käytetyt mallit

2.1 Skenaariotarkasteluissa käytetyt mallit ja niiden yhteensovittaminen

2.1.1 Mallien ominaisuudet ja päästövähennyskeinot

Taloudellisia energia-ympäristöanalyyskejä tehdään pääasiassa kahta eri perustyyppiä edustavilla malleilla: ns. yleisen tasapainon malleilla ja osittaistasapainomalleilla. Eri-tyyppiset mallit täydentävät toisiaan kuvaten talouden eri osia ja päästövähennyskeinoja. TIMES-malli on osittaistasapainomalli, joka painottuu energiajärjestelmän toiminnan ja siihen liittyvän teknologian ja investointien yksityiskohtaiseen kuvaukseen. TIMES-malli sisältää koko energia- ja päästösysteemin primäärienergiälähteiden tarjonnasta energia-palvelujen kysyntään. Sen sijaan siinä ei ole kuvattu kattavasti kansantalouden eri sektorien välisiä taloudellisia kytkentöjä. Yleisen tasapainon malli, kuten GTAP, kuvaa koko talouden. Se sisältää substituutio- ja tulovaikutukset, toimialojen vuorovaikutuksen ja kansainvälisen kilpailun, sekä takaisinkytkennät sektoreilta ja markkinoilta toisille. Yleisen tasapainon malleissa teknologiakuvaus on yleensä väistämättä hyvin karkea, jolloin mm. politiikkaskenaarioiden sopeutumista koskevat tulokset voivat poiketa huomattavasti osittaistasapainomallien tuloksista.

Tässä tutkimuksessa käytetyistä malleista RICE-malli tuottaa optimaaliset kulutus-, investointi- ja päästöurat ottaen huomioon talouden ja ilmaston välisen vuorovaikutuksen. TIMES- ja RICE-mallit tuottavat optimaalisen päästövähennyksen yli ajan, kaikki työssä käytetyt mallit alueiden välillä sekä GTAP ja TIMES sektorien välillä.

Taulukossa 1 esitetään TIMES- ja GTAP-mallien sisältämät päästövähennyskeinot. Global TIMES -mallissa päästövähennyskeinot keskittyvät investointeihin vähäpäästöisiin teknologioihin (ml. hiilidioksidin geologiseen varastointiin) ja metsitykseen. GTAP-mallissa energiajärjestelmän päästövähennyskeinot on kuvattu karkeasti ja osa keinoista puuttuu kokonaan. Sen sijaan GTAP-mallissa keskeisiä päästövähennyskeinoja ovat tuotanto- ja kulutusrakenteen muuttaminen sekä kokonaistuotannon tason alentaminen. Päästövähennyksestä huomattava osa voi kuitenkin GTAP-mallissakin tapahtua korvaamalla päästöintensiivisiä polttoaineita vähempipäästöisillä tai muilla tuotantopanoksilla.

Päästöjen vähentämisen ja kokonaistaloudellisten vaikutusten kannalta keskeisiä oletuksia ovat

- panosten liikkuvuus alueiden ja sektoreiden välillä
- substituutio- ja tulojoustot
- energiapanosten kustannusosuudet
- ulkomaankaupan joustot.

Taulukko 1. Päästövähennyskeinot TIMES- ja GTAP-malleissa.

	TIMES	GTAP
BKT:n alentaminen		X
Tuotanto/kulutusrakenteen muutos		X
Kansainväliset kilpailukykyvaikutukset		X
Energiapanosten korvaaminen muilla panoksilla	X	X
Energian kysynnän alentuminen hinnan noustessa	X	X
Siirtyminen vähempipäästöisiin teknologioihin	X	X
Siirtyminen päästöttömiin teknologioihin	X	
Energiatehokkuuden parantaminen	X	
Hiilidioksidin erotus ja varastointi	X	
Nielut	X	

Päästöjen vähennyksestä sitä suurempi osa tapahtuu kokonaistuotannon tasoa muuttamalla (i) mitä vähäisemmät ovat panosten korvaamismahdollisuudet eli substituoitajoukset, (ii) mitä vähemmän kulutuksessa korvataan hyödykkeitä toisillaan, (iii) mitä vähäisemmät ovat korvaamismahdollisuudet kotimaisen ja tuontihyödykkeen välillä tai (iv) mitä rajoitetummin panosten sallitaan liikkua.

Jos taas panokset voivat liikkua vapaasti sektorilta toiselle, tuotantorakenteessa voi tapahtua suuriakin muutoksia. Samaten, jos kotimaisen ja tuontihyödykkeiden korvaamismahdollisuudet ovat huomattavat, tuotannon alueellinen rakenne muuttuu.

2.1.2 Global TIMES -mallin kuvaus

Taustaa

Globaali energiajärjestelmämalli TIAM on kehitetty IEA:n ETSAP-ohjelmassa (Energy Technology Systems Analysis Programme). Mallin alkuperäinen rakentaja ja kehittäjä on ollut ohjelman kanadalaisia jäseniä edustava KanORS Consulting Inc. (Labriet & Loulou 2005), joka Montrealin yliopistojen yhteisestä GERAD-tutkimuslaitoksesta (Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions) syntynyt spin-off-konsulttiyritys. Malli on nykyisin kaikkien ETSAP-ohjelman jäsenten käytettävissä, ja sitä on kehitetty edelleen usean ohjelman jäsenorganisaation toimesta, myös VTT:n Energiajärjestelmät -osaamisalueella. Mallilla tehtyjä kasvihuonekaasupäästöjen rajoitusstrategioiden tarkasteluja on esitelty muun muassa kansainvälisellä Energy Modeling Forum -foorumilla (Labriet et al. 2006).

Mallin metodiikka

Globaali TIAM-malli pohjautuu metodiikaltaan täysin ETSAP-ohjelmassa kehitettyyn energijärjestelmien mallinnusjärjestelmään TIMES (Loulou et al. 2005). TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) käsittää toisaalta perusteellisesti dokumentoidun mallinnuksen matemaattisen perustan ja toisaalta kokoelman mallinnuksessa tarvittavia ohjelmistotyökaluja. TIMES pohjautuu kahteen aiemmin laajassa käytössä olleeseen vanhan sukupolven mallinnustyökaluun (MARKAL ja EFOM), joiden kummankin parhaat piirteet on pyritty yhdistämään TIMES-ympäristöön. Uuden sukupolven mallinnusvälineistöön on kuitenkin kehitetty myös monia edistyneitä ominaisuuksia, joita ei ollut MARKAL- ja EFOM-työkaluissa. TIMES- ja MARKAL-malleja on käytetty energijärjestelmämallinnukseen yli 40 maassa, sekä käytännön politiikka-analyysihin että mallinnusmenetelmiä koskeviin tarkasteluihin.

Osittaistasapainomallissa kuvataan yksityiskohtaisesti kaikki energiamuodot energian hankinnasta energiaa kuluttavien palvelujen tai tuotteiden kysyntään saakka. Palvelujen ja tuotteiden kysynnän perusura (Baseline) kullakin talouden sektorilla on arvioitava mallin ulkopuolella, eksogeenisena. Malli tuottaa kullekin energiamuodolle ja energiaa kuluttaville palveluille ja tuotteille hinnan ja muodostaa niiden kysynnän ja tarjonnan markkinatasapainon. Mikrotaloustieteen termein malli maksimoi kuluttajien ja tuottajien yhteistä ylijäämää ja olettaa täydellisesti toimivat hyödykemarkkinat.

Politiikkaskenaarioissa, joissa esimerkiksi asetetaan päästörajoitteita tai -veroja, malli tuottaa toisenlaisen hintojen kehityksen, jolloin myös loppukysynnän kehitys muuttuu kaikilla sektoreilla kullekin hyödykkeelle oletettujen kysynnän hintajoustojen mukaisesti. Mallilla tehtävät analyysit edellyttävät siis aina erillisen perusuran (Baseline) ja siitä poikkeavien politiikka- tai teknologiaskenaarioiden laskemista. Perusura tuottaa hyödykkeille perushintakehitykset, joiden pohjalta muissa skenaarioissa näistä poikkeavat hintakehitykset tuottavat hintajoustojen kautta uudet kysynnän ja tarjonnan tasapainot.

TIAM-malli sisältää myös yksinkertaisen ilmastomallin, joka perustuu hiilidioksidin osalta kolmen varaston hiilenkiertomalliin. Hiilenkiertomalli pohjautuu samaan lähestymistapaan kuin Nordhausin RICE-mallissa (Nordhaus & Boyer 1999), ja sen avulla voidaan laskea CO₂-pitoisuuksien kehitys ilmakehässä. Tämä yksinkertainen hiilenkiertomalli käyttäytyy varsin yhteensopivasti laajojen ja yksityiskohtaisten ilmastomallien kanssa (esim. Bernin malli). Metaanin ja dityppioksidin pitoisuuksia kuvataan kummankin kaasun tapauksessa yksinkertaisella yhden varaston eksponentiaalisen hajoamisen mallilla. Pitoisuuksista aiheutuvan säteilypakotteen TIAM-malli laskee täysin IPCC:n esittämien laskentakaavojen mukaisesti (IPCC 2001). Muut kasvihuonekaasut kuin hiilidioksidi, metaani ja dityppioksidi voidaan kuvata joko hiilidioksidiekvivalentteina yhdenmukaisesti hiilidioksidin kanssa tai eksogeenisena säteilypakotteen lisäter-

minä. Säteilypakotteesta malli laskee lopuksi myös lämpötilan muutokset ilmakehässä ja valtamerissä näille kahdelle lämpövarastolle kuvatun yksinkertaisen mallin avulla.

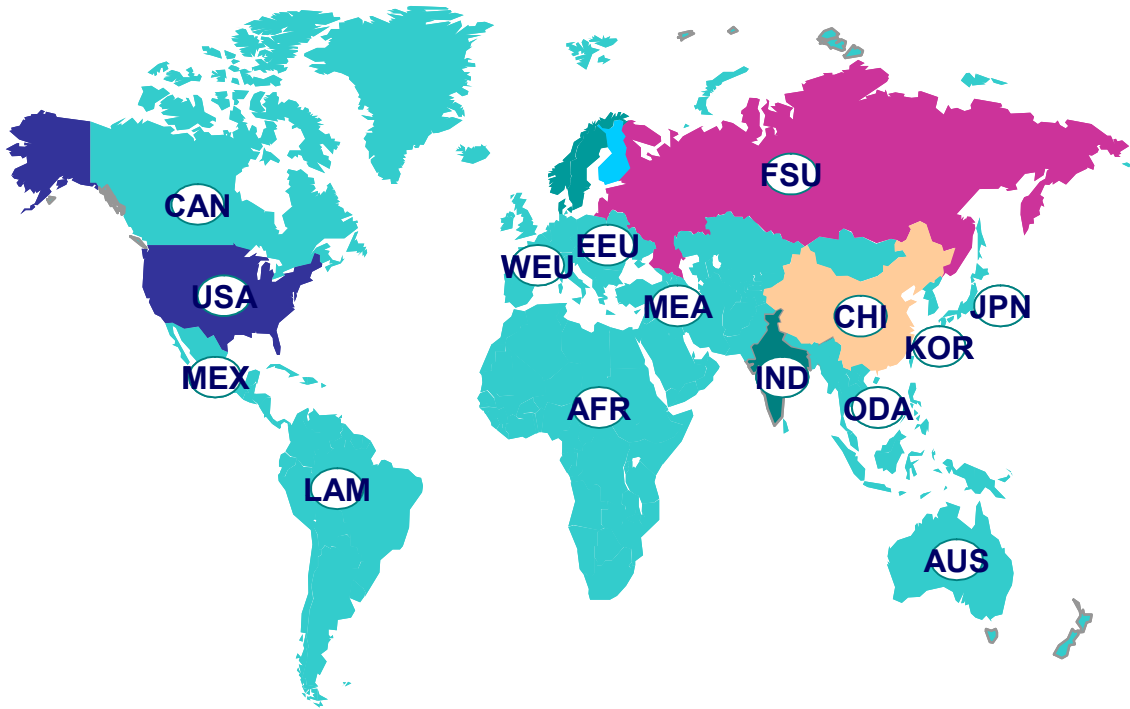
Mallin rakenne

Alkuperäisessä globaalissa TIAM-mallissa on kuvattu 15 eri aluetta (vrt. kuva 1). Mallin aluejakoa voidaan tarvittaessa muuttaa, mutta se edellyttää monien lähtötietojen hankkimista uusille alueille ja vastaavien tietojen päivittämistä muuttuneille entisille alueille. Mallissa on kuvattu kunkin alueen energiajärjestelmä pääosin ilman alueen sisäistä maantieteellistä rakennetta. Poikkeuksena ovat asumisen ja palvelujen energiankulutus, jotka voidaan jakaa enintään neljään alueen sisäiseen maantieteelliseen osaan ja/tai rakennusluokkaan.

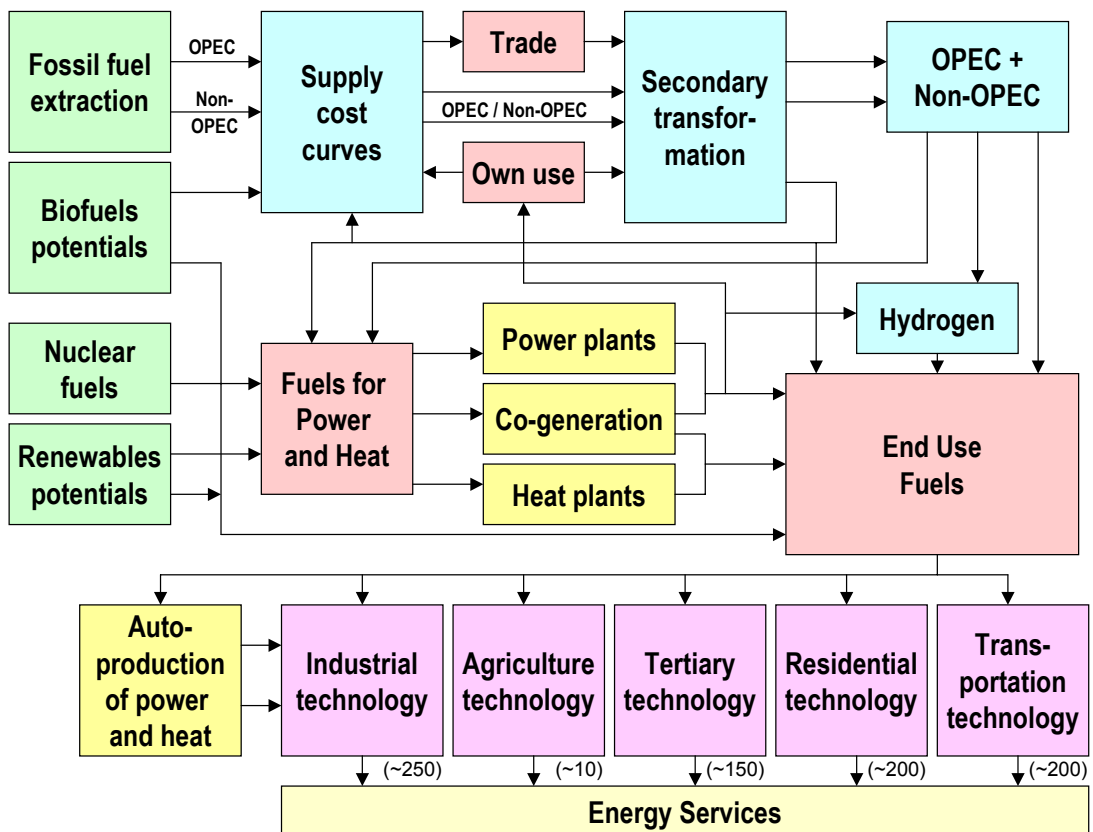
Kunkin alueen sisällä malli koostuu sektoreista, joiden jako noudattaa suunnilleen IEA:n tilastojen mukaista sektorijakoa, ja sektoreiden sisällä kuvatuista prosesseista eli tekniikoista sekä prosessien välisistä energia- ja materiaalivirroista (vrt. kuva 2). Kuvaus alkaa energian ja materiaalien primaarituotannosta eli esimerkiksi hiilen louhinnan tai öljy- ja maakaasukenttien hyödyntämisen kuvauksesta. Energian jalostuksen, siirron ja jakelun kautta eri energiamuotoja siirretään sähkön ja lämmön tuotantoon sekä edelleen loppukulutukseen. Loppukulutussektoreina on kuvattu erikseen kaikki tärkeimmät energiantensiiviset teollisuuden toimialat, muu teollisuus, palvelut, henkilö- ja tavara-liikenne sekä maatalous. Kullakin sektorilla tärkeimmät energiapalvelut (esimerkiksi kotitalouksien valaistus, kylmälaitteet, astianpesukoneet jne.) on lisäksi mallinnettu erikseen. Sähkön kysynnän vuotuiset kuormituskäyrät ovat kuusiportaisia, ja ne voidaan määrittellä erikseen kullekin sektorille ja energiapalvelulle. Lämmön kysynnän kuormituksen vaihtelu on kuvattu vain vuodenajoittain.

Malli sisältää raakaöljyn, LNG:n ja kivihiilen maailmankaupan sekä maakaasun siirto-yhteyksien kuvauksen. Lisäksi VTT:ssä malliin on lisätty olemassa olevat sähkön siirtoyhteydet eri alueiden välillä ja arvioidut uuden siirtokapasiteetin rakennuspotentialit.

Mallin teknologiakuvaus sisältää kattavan kasvihuonekaasupäästöjen kuvauksen kullakin sektorilla. Kuvausta voidaan tarvittaessa laajentaa myös muihin päästöihin.



Kuva 1. Global TIMES -mallin aluejako.



Kuva 2. TIAM-mallin yksinkertaistettu perusrakenne kullakin mallin alueella.

Eri sektoreiden teknologiavaihtoehtoissa on mukana runsaasti päästöjä vähentävää teknologiaa (esimerkiksi energiatehokkuuden parantaminen tai hiilidioksidin talteenotto). Kunkin tekniikan osalta on pyritty arvioimaan myös hyötysuhteiden ja kustannusten kehitys tulevaisuudessa. Teknologista kehitystä voidaan tarkastella myös skenaarioittain erilaisin oletuksin eri tekniikoiden kehityksen nopeudesta. Lisäksi mallissa voidaan kuvata teknologian oppimiskäyrien mukaisia riippuvuuksia uusien tekniikoiden suorituskyvyn ja kumulatiivisten investointien välillä.

2.1.3 RICE-mallin kuvaus

RICE (Regional dynamic Integrated model of Climate and Economy) on talouden ja ilmaston kuvaukset yhdistävä globaali intertemporaalinen malli, jossa päätöksenteossa otetaan huomioon tuotot ja kustannukset tästä ikuisuuteen. RICE on useita alueita käsitävä versio DICE-mallista. Molemmat mallit on kehitetty professori Nordhausin johdolla Yalen yliopistossa (ks. <http://nordhaus.econ.yale.edu/>). Tässä tutkimuksessa käytettiin RICE-mallin versiota vuodelta 1999 (Nordhaus & Boyer 1999). DICE-mallista Nordhausin ryhmä on tuottanut päivitetyn version ja RICE-mallin päivitys on tekeillä. RICE-mallilla voidaan tarkastella ilmastopolitiikan tavoitteiden ja toteutuksen eri vaihtoehtojen vaikutuksia pitkällä aikavälillä. Mallilaskelmien tuloksena saadaan mm. arviot päästömaksun suuruudesta sekä päästövähennyksen suuruudesta, ajoituksesta ja alueellisesta jakautumisesta. Viime aikoina Nordhaus on käyttänyt DICE-mallia mm. osallistuessaan Sternin laskelmien pohjalta syntyneeseen keskusteluun (Nordhaus 2007).

RICE-malli tuottaa optimaalisen kulutus-säästämisuran maksimoimalla kuluttajien hyötyä yli ajan. Kuluttaja tekee päätöksen nykyisen ja tulevan kulutuksen välillä valitsemalla investointien määrän. Pääomakannan kehittyminen yli ajan määräytyy täten mallista. Keskeisiä parametreja mallissa ovat aikapreferenssi eli diskonttokorko sekä ns. varallisuusvaikutusta kuvaava parametri, joka kuvaa pyrkimystä kulutusuran tasaisuuteen eri sukupolvien välillä. Reaalinen markkinakorko määräytyy näiden tekijöiden ja talouden kasvuvauhdin perusteella. Rajoitteina mallissa ovat alueittaiset tuotantoteknologiat sekä väestökehitykset, lähtöhetken pääomakannat ja luonnonvarat. Tekninen kehitys annetaan malliin parametrina. Keskeistä mallissa on, että taloudellinen kehitys, joka tuottaa sekä päästöjä että potentiaalia investoida päästoleikkauksiin, ei ole eksogeenisesti oletettu vaan se syntyy talouden perustekijöistä, kuten tuottavuudesta. Mallissa on kytkentä ilmastosta talouteen, eli ilmaston lämpeneminen vaikuttaa talouskasvua heikentävästi. Malli käsittää vain yhden tuotantosektorin. Perinteisten hyödykkeiden ulkomaankauppaa ei tässä raportissa käytetyssä malliversiossa ole. Ainoastaan päästölupia myydään alueelta toiselle.

RICE-mallissa päästövähennyskeinot ovat tuotannon tason ja tuotannon päästöintensivisyyden alentaminen. Alueittaiset päästövähennyskustannusfunktiot on estimoitu aiemman tutkimuksen perusteella. Mallissa fossiiliset polttoaineet on yhdistetty ns. hiilienergia-

panokseksi. Hiilienergian tarjonta on oletettu rajalliseksi ja kustannukset nousevat varannon hupertessa. Fossiilisten polttoaineiden hinta koostuu siten markkinahinnasta, resurssien rajallisuutta kuvaavasta niukkuushinnasta sekä mahdollisesta päästömaksusta. Uusiutuvaa energiaa tässä työssä käytetty malliversio ei suoranaisesti sisällä. Kasvihuo-nekaasupäästöt käsittävät teollisesta toiminnasta aiheutuvat päästöt, jotka ovat pääosin hiilidioksidipäästöjä, sekä maankäytön muutoksesta aiheutuvat päästöt, jotka ovat kuitenkin eksogeenisiä. Ilmastomallin hiilenkiertomalli on samantapainen kuin Global TIMES -mallissa ja se on kuvattu kohdassa 2.1.2.

2.1.4 GTAP-mallin kuvaus

GTAP-malli on globaali kokonaistaloudellinen malli (Hertel 1997), joka on kehitetty osana Global Trade Analysis -projektia Purduen yliopistossa (ks. www.gtap.org). Malli ratkaistaan tietylle vuodelle eli se on staattinen. Toisaalta malli sisältää melko yksityiskohtaisen kuvauksen talouden rakenteesta. Malli käsittää kullekin alueelle useita tuotanto-sektoreita, edustavan kuluttajan, julkisen kulutuksen sekä verot ja tullit. Alueet käyvät kauppaa keskenään. Eri maissa tuotetut hyödykkeet on oletettu epätäydellisiksi substituuteiksi. Peruspanoksia mallissa ovat pääoma, työvoima, maa ja luonnonvarat. Tässä tutkimuksessa käytetyssä perusversiossa pääoma ja työvoima liikkuvat vapaasti sektorilta toiselle. Maa on sektorikohtainen panos, ja luonnonvarojen liikkuvuus on rajallinen. Alueiden välistä panosten liikkuvuutta ei ole sallittu mallin perusversiossa. Malli on rakennettu alun perin maatalous- ja kauppapolitiikkatarkasteluihin.

GTAP-E on kehitetty (Burniaux & Truong 2002) ilmastopolitiikkalaskelmia varten. GTAP-E sisältää useita fossiilisia polttoaineita (öljy, hiili, kaasu, öljyjaloitteet) sekä sähkön, joita voidaan korvata toisillaan ja muilla panoksilla energiantuotannossa, muiden toimialojen tuotannossa ja loppukulutuksessa. Energiantuotantoteknologiat on mallitettu käyttäen yleisiä taloustieteen funktioita. GTAP-E ei siis sisällä kuvauksia todellisista nykyhetken tai potentiaalisista tuotantoteknologioista. CO₂-päästöttömiä energiantuotantoteknologioita ei ole kuvattu mallissa. Malli sisältää vain CO₂-päästöt.

GTAP-laskelmissa, joissa malliin asetetaan globaali päästövähennysmäärä, malli arvioi päästöluvan hinnan, jolla annettu päästötavoite saavutetaan. Päästömaksu nostaa suoraan polttoaineiden hintoja sekä välillisesti sähkön ja lämmön hintoja muuttaen suhteellisia hintoja sekä tuotannossa että kulutuksessa. Suhteellisten hintojen muutos aiheuttaa kulutuksessa ja tuotannossa siirtymää energiapanoksista ja -hyödykkeistä muihin panoksiin ja hyödykkeisiin. Vastaavasti laskelmissa, joissa sähkön ja polttoaineiden hintoja nostetaan TIMES-tulosten mukaisesti, suhteellisten hintojen muutos aiheuttaa energiapanosten korvaamista muilla panoksilla. Koska substituutiomahdollisuudet ovat rajalliset, energiakustannusten nousu nostaa tuotantokustannuksia. Kotimaiset hinnat riippuvat jossain määrin muiden alueiden tuotantohinnoista, koska kotimaisia ja ulkomaisia

hyödykkeitä voidaan korvata toisillaan. Muiden panosten hintoihin aiheutuukin painetta joustaa alaspäin tuotantokustannusten nousun hillitsemiseksi ja kilpailukyvyyn säilyttämiseksi. Koska tuotantosektorien kustannusrakenteet eroavat merkittävästi, myös niiden suhteelliset tuotantokustannukset muuttuvat. Energiaintensiivisten tuotantosektorien kannattavuus heikkeneekin suhteessa työ- ja pääomaintensiivisiin sektoreihin, joten tuotantoresursseja kannattaa siirtää energiaintensiivisiltä sektoreilta työ- ja pääomaintensiivisille sektoreille.

Kotimaisessa kulutuksessa energiaa ja energiaintensiivisiä hyödykkeitä korvataan vähemmän energiaa kuluttavilla hyödykkeillä hintajoustojen mukaisesti. Sen sijaan muiden toimialojen välituotekäytössä hyödykkeitä ei voi korvata toisillaan. Mallissa oletetaan, että kotimaisia ja tuontihyödykkeitä voi korvata toisillaan. Vientikysynät riippuvat muiden alueiden kustannusrakenteesta ja teknologiasta. Tällöin tuotantoa siirtyy niille alueille, joissa tuotantoteknologia on vähäpäästöisempää ja/tai päästöjä saadaan alennettua edullisemmin. Suhteellisten hintojen lisäksi hyödykkeiden kysyntään vaikuttaa tulojen muutos. Päästömaksu tai sähkön ja polttoaineiden hinnan nousu alentaa reaalisia tuloja ja siten kokonaiskysyntää. Jos substituutiovaikutus on tulovaikutusta voimakkaampi, työvoima- ja pääomaintensiivisten sektoreiden kysyntä voi kuitenkin lisääntyä erityisesti niillä alueilla, joilla ne saavat kilpailuetua.

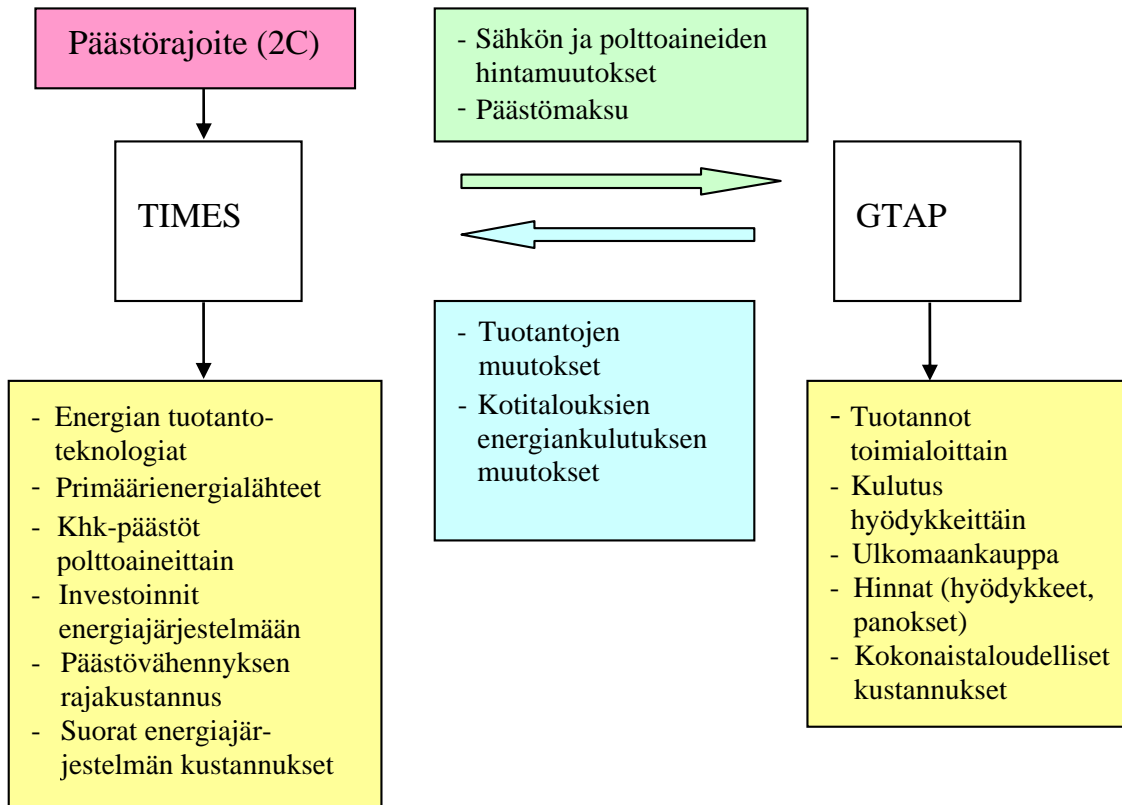
2.1.5 Mallien yhteensovittaminen

Tässä tutkimushankkeessa GTAP-mallin tuottamia arvioita tuotannon määrien ja energian loppukulutuksen muutoksista hyödynnetään Global TIMES -mallissa, jossa kyseiset parametrit on määritetty eksogeenisesti (vrt. kohta 2.1.2). Tyypillinen tapa käyttää GTAP-mallia on antaa päästörajoite malliin, jolloin malli arvioi tarvittavan päästömaksun suuruuden sekä mm. sähkön ja polttoaineiden hintamuutokset. Tässä tutkimuksessa päätettiin kuitenkin hyödyntää Global TIMES -mallin tuloksia sähkön ja polttoaineiden alueellisista hintamuutoksista, koska ne perustuvat selvästi tarkempaan kuvaukseen nykyisestä ja tulevasta energiajärjestelmästä. Tällöin kilpailukykyvaikutukset ja siten alueelliset toimialamuutokset saadaan arvioitua tarkemmin.

Tässä tutkimuksessa käytettävässä mallikehikossa TIMES-malli on mallisysteemin energiasektori ja GTAP-malli kuvaa muuta taloutta (vrt. kuva 3). TIMES-mallin tuottamat sähkön ja polttoaineiden hintamuutokset syötetään GTAP-malliin, joka arvioi niiden vaikutukset toimialojen tuotantoon ja kotitalouksien energiankulutukseen. Nämä tiedot puolestaan annetaan TIMES-mallin lähtötiedoiksi ja TIMES-malli ajetaan uudelleen. Koska tuotantojen tasot ovat pääsääntöisesti alentuneet, päästöjen vähentämisen kustannukset sekä sähkön ja polttoaineiden hintojen nousut jäävät pienemmiksi kuin ensimmäisellä kerralla. Iterointia voitaisiin jatkaa, kunnes mallisysteemi konvergoituu. Tässä tutkimuksessa suoritetuissa skenaarioajoissa, joissa talouden muutokset jäivät

pääsääntöisesti melko vähäiseksi, useampaan iterointiin ei kuitenkaan ollut tarvetta. Mallien yhteensovittamista tarkastellaan yksityiskohtaisemmin julkaisussa Pohjola (2008).

Global TIMES - GTAP -mallikehikon lisäksi GTAP-mallia käytettiin perinteisellä tavalla arvioitaessa globaalin päästömaksun suuruutta. Näissä laskelmissa päästövähennysten määrät vastaavat RICE-mallin arvioita päästövähennystarpeesta ko. periodilla.



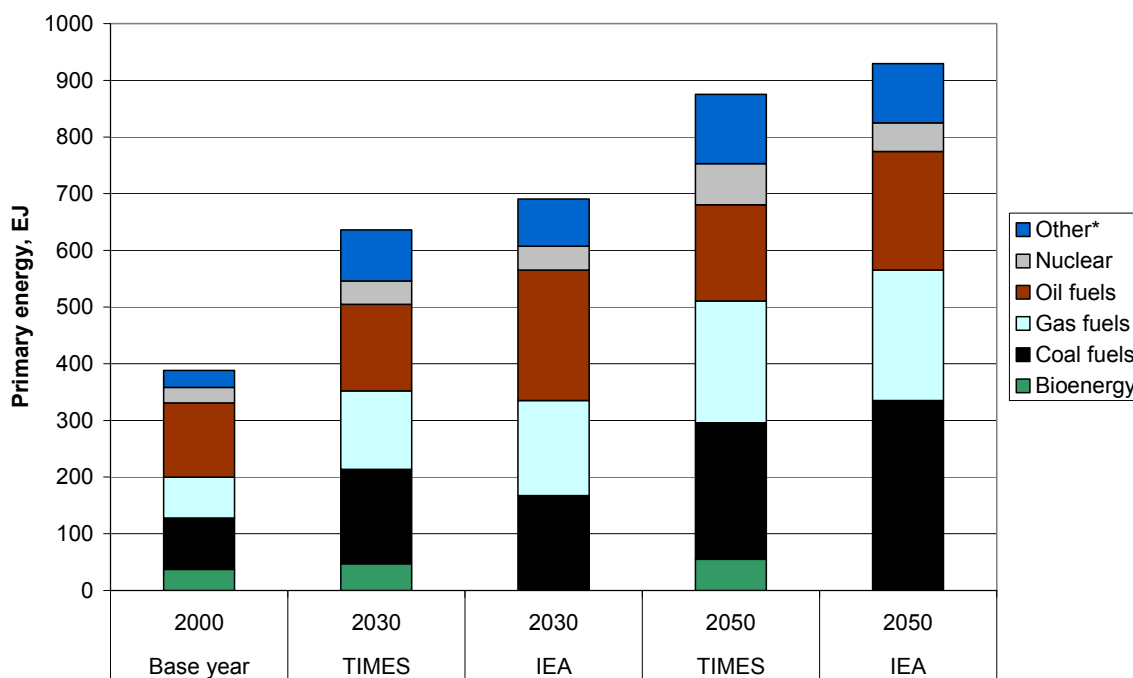
Kuva 3. Periaatekuva GTAP- ja TIMES-mallien yhteensovittamisesta.

2.2 Baseline- ja politiikkaskenaariot

Skenaariotarkasteluissa keskeisiä tekijöitä ovat muun muassa talouden ja energian kysynnän alueelliset kasvut, primäärienergiaresurssit ja niiden markkinahinta, kansainvälisen ilmastopolitiikan kehittyminen sekä energiateknologioiden kehitys. Energiateknologioiden kysyntätarkasteluissa laskentavuosiksi valittiin vuodet 2020 ja 2030 ja 2050. Ilmastopolitiikkaskenaarioissa tarkastelujakso on aina vuoteen 2100 asti, koska ilmastolliset ilmiöt ovat hyvin hitaita. Hiilidioksidin poistuminen ilmakehästä tapahtuu noin 100–200 vuoden aikavakioilla, joten tarkasteltaessa ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksien muutoksia tarvitaan hyvin pitkä aikajakso laskennassa.

2.2.1 Baseline

Energian kysyntää vuosina 2020, 2030 ja 2050 on arvioitu viidellätoista eri maantieteellisellä alueella (vrt. kuva 1). Mallitarkasteluissa energian kysyntä on riippuvainen muun muassa oletetusta alueellisesta väestön kasvusta ja talouden kasvusta. Skenaarioissa lähtökohdaksi, eli Baseline-skenaarioiden lähtöoletuksiksi, on valittu YK:n väestökasvuennusteet vuoteen 2050 asti (UNFCC 2004). Talouskasvuennusteissa on käytetty Global TIMES ja RICE-tietokantojen lähtöoletuksia. Valittu Baseline edustaa nopean talouskasvun mukaista ennustetta maailman kehityksestä, jossa fossiilisten polttoaineiden käyttöä ei rajoiteta esimerkiksi ilmastopoliittisin perustein ja lisäksi fossiilisten polttoaineiden hintakehitys on erittäin maltillinen. Oletetun Baseline-kehityksen mukainen energian kysynnän kasvu on verrattavissa International Energy Agency (IEA) näkemykseen ja vastaa lisäksi IPCC:n julkaiseman SRES-skenaarioperheen B2-skenaariota (IPCC 2000). Kuvassa 4 verrataan Global TIMESin Baseline-skenaariota IEA/OECD:n vuonna 2006 julkaisemaan Baseline-skenaarioon (IEA 2006). TIMES-skenaariossa ei esitetty polttoaineen tuotannon häviöitä, jotka ovat merkittäviä erityisesti öljyn tuotannossa sivutuotteena syntyvän metaanin vuoksi. RICE-mallin lähtöoletukset tuottavat kehittyville maille TIMES-skenaarioita alhaisemman talouskasvun ja siten myös energian kysynnän kasvu kyseisillä alueilla on RICE-tarkasteluissa maltillisempi kuin Global TIMES -skenaarioissa.



Kuva 4. TIMES-Baseline- ja IEA-Baseline- (IEA 2006) skenaariot. IEA-Baseline-skenaariossa bioenergia sisältyy sektoriin "other". TIMES-Baseline-skenaarioissa primäärienergian kulutus ei sisällä polttoaineen tuotannon häviöitä.

2.2.2 Politiikkaskenaariot

Ilmastopolitiikan vaikutuksia tulevaisuuden energiainvestointeihin tarkasteltiin oletta-
malla, että kansainvälinen ilmastopöytäkirja kattaa kaikki maat ja että valtiot voivat käydä
globaalia päästökauppaa. Tällöin päästövähennykset voidaan toteuttaa siellä, missä se
on edullisinta. Khk-päästöjen rajoittamisen lähtökohdaksi valittiin EU:n esittämä kahden
asteen tavoite. TIMES-järjestelmässä 2 °C tavoite vastaa noin 450 ppm khk-pitoisuus-
tavoitetta, kun ilmaston herkkyydeksi oletettiin kolme astetta. Ilmaston herkkyysspara-
metri kuvaa maapallon tasapainolämpötilan muutosta, johon keskilämpötila hakeutuu,
kun ilmakehän CO₂-pitoisuus asettuu tasolle 550 ppm. Ilmakehän herkkyyttä ei tunneta
tarkasti, sen epävarmuusalue on IPCC:n mukaan 2–4,5 °C (IPCC 2007).

Ilmastopolitiikan merkitystä simuloitiin lisäksi määrittämällä Kioton pöytäkirjan luokit-
telemille teollisuusmaille (Annex-1-maille) päästökattot ja rajoittamalla globaalia päästö-
kauppaa teollisuusmaiden ja kehitysmaiden (ei-Annex-1-maiden) kesken. Kyseisissä
skenaarioissa oletettiin, että teollisuusmaat voivat tiettyyn rajaan saakka toteuttaa khk-
päästövähennystoimenpiteitä kehitysmaissa mutta joutuvat maksamaan ns. transak-
tiokustannuksia 10 €/t CO₂ Annex-1- ja ei-Annex-1-maiden välillä käydystä päästökau-
pasta. Tavoitteena tarkasteluissa oli arvioida, kuinka suuri merkitys on globaalin päästö-
kaupan rajoituksilla kustannuksiin ja investointeihin eri alueilla. Tilanne vastaa nykyistä
EU-politiikkaa, jossa toimijat voivat toteuttaa osan päästövähennystavoitteestaan puhta-
an kehityksen mekanismien (JI:n ja CDM:n) tuottamalla päästövähennyksillä.

2.3 Kokonaistaloudelliset tarkastelut

2.3.1 RICE-skenaariot

RICE-laskelmissa käytetty aineisto ja parametriarvot ovat pääosin alkuperäiset RICE99-
versiossa olevat. RICE-skenaariot ulottuvat vuoteen 2100. RICE-skenaarioissa käytetyt
väestönkasvut perustuvat YK:n ennusteisiin vuosille 2015 ja 2050 (United Nations
2005) ja väliperiodit on laskettu intrapoloimalla sekä loppujakso 2050–2100 ekstrapo-
loimalla. Talouden kasvuvauhtien henkeä kohden on oletettu teollisuusmaissa hidastuvan
ajan myötä siten, että teollisuus- ja kehitysmaiden bruttokansantuotteet henkeä kohden
konvergoituvat jossain määrin tarkastelujakson loppupuolella. Esimerkiksi Kiinassa
bruttokansantuotteen henkeä kohden on oletettu kasvavan alle kolme prosenttia vuodessa
vuoden 2005 jälkeen ja kun väestö ei kasva, talouskasvu on samaa luokkaa. Intian talous-
kasvu on hieman korkeampi. Yleisesti voidaan sanoa, että RICE-mallissa kehittyvien
alueiden talouskasvu jää Global TIMES -skenaarioita alhaisemmaksi, kun taas esim.
Yhdysvaltojen talouskasvu on voimakkaampaa. Talouden kasvuvauhdit on RICE-
mallissa kalibroitu eksogeenisten teknistä kehitystä kuvaavien alueittaisten parametrien
avulla.

Diskonttokoron (aikapreferenssin) arvoksi on RICE99-mallissa oletettu lähtöhetkellä kolme prosenttia, kun Stern käytti raportissaan arvoa 0,1. Diskonttokorko alenee ajan myötä siten, että se on 2,3 prosenttia vuonna 2100. Varallisuusvaikutus on RICE99-mallissa sama kuin Sternillä (Stern 2007), eli kulutuksen kaksinkertaistumisen oletetaan leikkaavan lisäkulutuksen arvostuksen puoleen. Markkinakoroksi saadaan tällöin viisi prosenttia, jos talouden kasvuvauhti on kaksi prosenttia.

RICE-mallin perusuralla tuotannon päästöintensiivisyys alenee. Alentuminen vaihtelee alueittain riippuen alueen teknologista kehitystä koskevista oletuksista. Tuotannon päästöintensiivisyyden oletetaan konvergoituvan huomattavasti, mutta ei täydellisesti, tulevaisuudessa. Kehittyvillä alueilla, kuten Kiinassa ja Intiassa, päästöt jäävät pienemmiksi kuin Global TIMES -skenaarioissa, koska talouskasvu on niissä maltillisempaa. Hiilienergian saatavuus on RICE-mallissa rajallinen. Hiilienergian rajakustannukset nousevat loivasti, kunnes kumulatiivinen fossiilisten polttoaineiden käytön hiilisisältö ylittää 3 000 GtC. Tämän jälkeen tarjontakäyrä jyrkkenee selvästi, ja kumulatiivisen käytön hiilipitoisuuden ylittäessä 6 000 GtC hinnan nousu ei juurikaan lisää tarjontaa.

2.3.2 GTAP-mallin aineisto ja parametrit

GTAP-aineisto on globaali maailmantaloutta kuvaava tietokanta. Tässä tutkimuksessa käytettiin GTAP-dataversiota kuudelle vuodelle 2001 (Dimaranan 2006). Aineiston runkona ovat alueittaiset panos-tuotosaineistot. Panos-tuotosaineisto kuvaa kunkin alueen tuotantosektorien kustannusrakenteet sekä loppukulutuskomponenttien eli yksityisen ja julkisen kulutuksen, investointien ja viennin hyödykerakenteet. Lisäksi panos-tuotosaineisto sisältää verot. GTAP-mallin aineisto sisältää myös alueiden väliset kauppavirrat sekä vientituet ja kaupan esteet. Tietokantaan on liitetty lisäksi energiankäyttöä ja päästöjä koskeva aineisto. Aineisto ja parametriarvot esitetään yksityiskohtaisesti julkaisussa Pohjola (2008).

Tuotantosektorien energiaintensiivisyys vaihtelee huomattavasti alueittain. Esimerkiksi sähkökustannusten osuus tuotantokustannuksista vaihtelee yli neljästä prosentista alle puoleen prosenttiin. Samaten esimerkiksi rauta- ja terästeollisuuden sähköintensiivisyys vaihtelee GTAP-aineiston mukaan yli 25 prosentista alle viiteen prosenttiin. Tällöin tuotantomuutokset alueittain vaihtelevat suuresti sähkön hinnan noustessa ja tuotanto voi kasvaa alueilla, joilla sähköintensiivisyys on alhainen, kun kilpailukyky maailmanmarkkinoilla paranee.

GTAP-tietokanta sisältää myös mallin parametrien arvot. Tuotantopanosten välistä korvattavuutta kuvaavat substituutiojoustot vaihtelevat eri panosten välillä. Sen sijaan kaikille alueille substituutiojoustot ovat samat. Täten erot eri alueiden päästövähennyskustannuksissa aiheutuvat vain kustannusrakenteiden eroista.

Kotimaisen ja tuontihyödykkeen substituutiojoustot vaihtelevat hyödykkeittäin. Jousto on pienin liikenteelle, palveluille, öljytuotteille sekä maataloudelle. Näitä tuotteita on siis vaikein korvata muilla alueilla tuotetulla tuotteella. Korkeimmat joustot ovat kaasulle ja öljylle. Näiden tuotteiden oletetaan siis olevan hyvin samanlaisia riippumatta siitä, missä maassa ne on tuotettu. Kotitalouksien kulutuksen hintajoustot vaihtelevat alueittain ja hyödykkeittäin.

2.4 Energiajärjestelmätarkastelut

2.4.1 Fossiiliset energiaresurssit

TIMES-tietokannassa on arviot sekä fossiilisten että uusiutuvien primäärienergiälähteiden hyödynnettävistä resursseista alueittain (vrt. taulukot 2 ja 3). Taulukon 2 tiedot on päivitetty uusimmassa versiossa Global TIAM -mallista, joka ei vielä ollut SETELI-skenaariossa käytössä. Päivitetystä TIAM-tietokannassa öljystä noin 3 600 EJ (590 Gb) on resursseja, jotka ovat taloudellisesti edullisesti hyödynnettävissä lyhyellä aikavälillä. Tämä arvio edustaa konservatiivista näkemystä hyödynnettävistä öljyresursseista, kun esimerkiksi BP:n arvion (BP 2007) mukaan öljyreservit ovat peräti 7 300 EJ (1 200 Gb). BP:n esittämästä reserviarviosta kriitikot ovat arvelleet noin 1 900 EJ:n (320 Gb) olevan epävarmoja Lähi-Idän resursseja (EWG 2007). Noin 11 800 EJ päivitetystä TIAM-tietokannan öljystä on reservejä, mikä vastaa esimerkiksi US Geological Survey:n (USGS 2000) julkaisemia arvioita. Reservit antavat kuvan pitkän aikavälin öljyntuotantopotentialista. Ei-konventionaaliset öljyresurssit ja reservit sisältävät potentiaaliarviot öljyhiekka-, öljyliuske- ja erityisen raskaista raakaöljyesiintymistä. TIAM-tietokannan hiilestä noin 20 000 EJ on reservejä, mikä vastaa esimerkiksi BP:n (BP 2007) arviota. TIAM-tietokannan kaasusta noin 13 000 EJ on reservejä, mikä on huomattavasti suurempi kuin esim. BP:n (BP 2007) arvio 6 500 EJ (181 Tm³). TIAM-tietokannassa oletukset resursseista ovat myös suuremmat kuin USGS:n esittämät arviot. SETELIn jatkohankkeessa (ks. luku 5) yksi osatehtävä on arvioida fossiilisten polttoaineiden reservi- ja resurssiarvioita, ja TIMES-tietokantaa tullaan päivittämään saatujen tulosten perusteella. Toisaalta kriittinen tekijä uusien resurssien käyttöönotossa etenkin lähivuosikymmeninä ei välttämättä ole oletettu reservin suuruus vaan investointien toteutumisen hitaus. On hyvin epävarmaa, pystytäänkö tuotantoa todellisuudessa kasvattamaan kysynnän kasvaessa, kuten TIMES-skenaarioissa on optimaalisesti oletettu.

Taulukko 2. Yhteenveto fossiilisten polttoaineiden TIMES-tietokannan resursseista.

EJ	Hiili & ligniitti	Öljy		Kaasu	
		Konv.	Ei-konv.	Konv.	Ei-konv.
Afrikka	8 900	1 500	400	2 200	0
Amerikka	72 700	3 800	19 000	5 900	380
Eurooppa	9 500	300	300	1 200	800
Intia	9 500	60	0	100	30
Kiina	13 700	400	300	200	60
Lähi-Itä	100	6 900	3 700	5 900	700
Muu Aasia & Australia	27 300	300	300	4 200	300
Venäjä	26 600	1 900	3 100	9 200	3 100
Yhteensä	168 000	15 200	27 100	29 000	3 500

Taulukko 3. TIMES-skenaarioissa käytetyt oletukset uusiutuvien energialähteiden ja ydinvoimapolttoaineiden resursseista.

Resurssi	Oletetut rajoitteet resurssien käytettävyydessä		Kapasiteetti-rajoitteet	Markkina-rajoitteet	
Uraani (fissio, ei hyötöreakto-reita)	Kategoria	1 000 t	EJ	Alueelliset rajoitteet (Globaali yhteensä • 3 500 GW)	Endogeeninen (vrt. kapasiteetti-rajoite)
	RAR	3 300	1 450		
	EAR-1	1 500	660		
	EAR-2	2 500	1 100		
	Spekulatiivinen	7 500	3 300		
	Ei-konventionaal.	3 200	1 400		
	Yhteensä	18 000	7 900		
Litium (fuusio)	Vrt. kapasiteettirajoitteet		Globaali ja alueelliset rajat vuosinvestoinneille	Endogeeninen, rajoitettu maksimi vuosikasvu	
Tuuli	Ei rajoitteita		Suuret alueelliset potentiaalit (globaali yht. • 12 000 GW)	Max. 35 % kasvu per vuosineljännes (Kanada: 50 %)	
Aurinko	Ei rajoitteita		Suuret alueelliset potentiaalit	Max. 20–30 % kasvu per vuosineljännes	
Biopolttoaineet	Alueelliset max. vuosisaannot Globaalit potentiaalit: Energiakasvit ~200 EJ/a Sivutuotteet ~60 EJ/a Yhteensä ~260 EJ/a		Ei rajoitteita	Endogeeninen	

Taulukossa 3 on yhteenveto uusiutuvien energialähteiden ja ydinvoimapolttoaineiden resurssioletuksista ja niihin liittyvistä rajoitteista. SETELI-hankkeessa tehtiin lisäksi omat arviot bioenergian ja tuuliresurssien alueellisista potentiaaleista. Vesivoimaresurssi-arvioissa käytettiin World Energy Councilin (WEC 2004) julkaisemia arvioita.

2.4.2 Bioenergiaresurssit

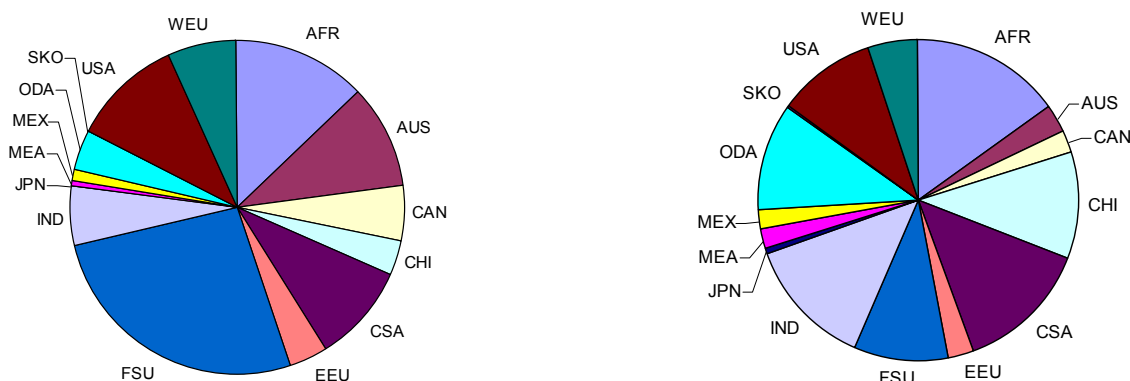
Biomassapotentiaalin arviointia varten koottiin tiedot pääsoin julkisista tilastoista. Lähtötietoina käytettiin ensisijaisesti Faostat-tilastoja vuodelta 2002 (Faostat 2003), jota käytettiin lähteenä maan ja metsän käytön osalta. Metsän käytön osalta huomioitiin metsien hakkuut, sahatavaran tuotanto ja sellun keitto. Polttoaineen ominaisuuksille käytettiin lähteenä julkaisua Alakangas 2000. Metsästä ja pelloilta saatavien sivutuotteiden ja tähteiden energiat ja niiden hyödyntämismahdollisuudet arvioitiin alueittain perustamalla arviot tunnettuihin tuotantolukuihin. Jätteiden määrien arviointiin käytettiin Euroopan osalta Eurostat-tilastoa (Eurostat 2004) sekä Climbus-ohjelman hankkeen ”Uudet jätteiden käsittelykonseptit kasvihuonekaasujen vähentämisessä ja niiden kehittäminen liiketoiminnaksi keskipitkällä tähtäimellä” tuloksia (Mroueh 2007). Jätteiden energian hyödyntämisessä käytettiin maltillisia arvioita.

Biomassapotentiaalin kannalta on hyvin merkittävää, voidaanko nykyistä viljelyalaa vapauttaa energiakasvien tuotantoon. Tällöin on otettava huomioon erityisesti se, miten maapallon väestön kasvu jatkuu ja miten turvata väestön ravinnon tuotanto. Mahdollisten energian tuotantoon soveltuvien kasvien ominaisuuksia ei vielä täysin tunneta. Ongelman saattaa aiheuttaa myös se, että energiapotentiaali ja energian käyttö eivät alueittain kohtaa toisiaan, mistä aiheutuu logistisia ongelmia. Väestön kasvuun liittyy myös jatkuva jätemäärän kasvu ja sen energian hyödyntäminen. Maapallon väestö siirtyy jatkuvasti kaupunkiyhteisöihin, jolloin jätevirrat keskittyvät ja niiden käsittely aiheuttaa ongelmia. Toisaalta maailmassa on vielä alueita, joissa jätemäärät asukasta kohden ovat hyvin pienet verrattuna Euroopan ja Pohjois-Amerikan maihin. Näissä maissa elintason nousu kasvattaa jätemääriä olennaisesti.

Kuvassa 5 verrataan VTT:n bioenergiapotentiaaliarvioita TIMES-laskemissa käytettyyn arviointiin. TIMES-arviot perustuvat pääosin lähteeseen Hoogvijk 2004, jota on käytetty tausta-aineistona myös uusimmassa IPCC:n arvioreportissa (IPCC 2007). Tässä yhteydessä tulee kuitenkin huomata, että eri lähteissä esitettyjen globaalien potentiaaliarvioiden vaihtelu pitkällä aikavälillä on hyvin merkittävä (noin 0–1 000 EJ), mikä kertoo bioenergiapotentiaaleihin liittyvästä epävarmuudesta. Myös alueelliset erot esitetyissä bioenergiapotentiaaliarvioissa ovat erittäin suuret. SETELIn jatkotyössä bioenergiapotentiaaliarvioiden kriittinen tarkastelu onkin yksi painopistealueista.

TIMES: 174 EJ

VTT: 80 EJ

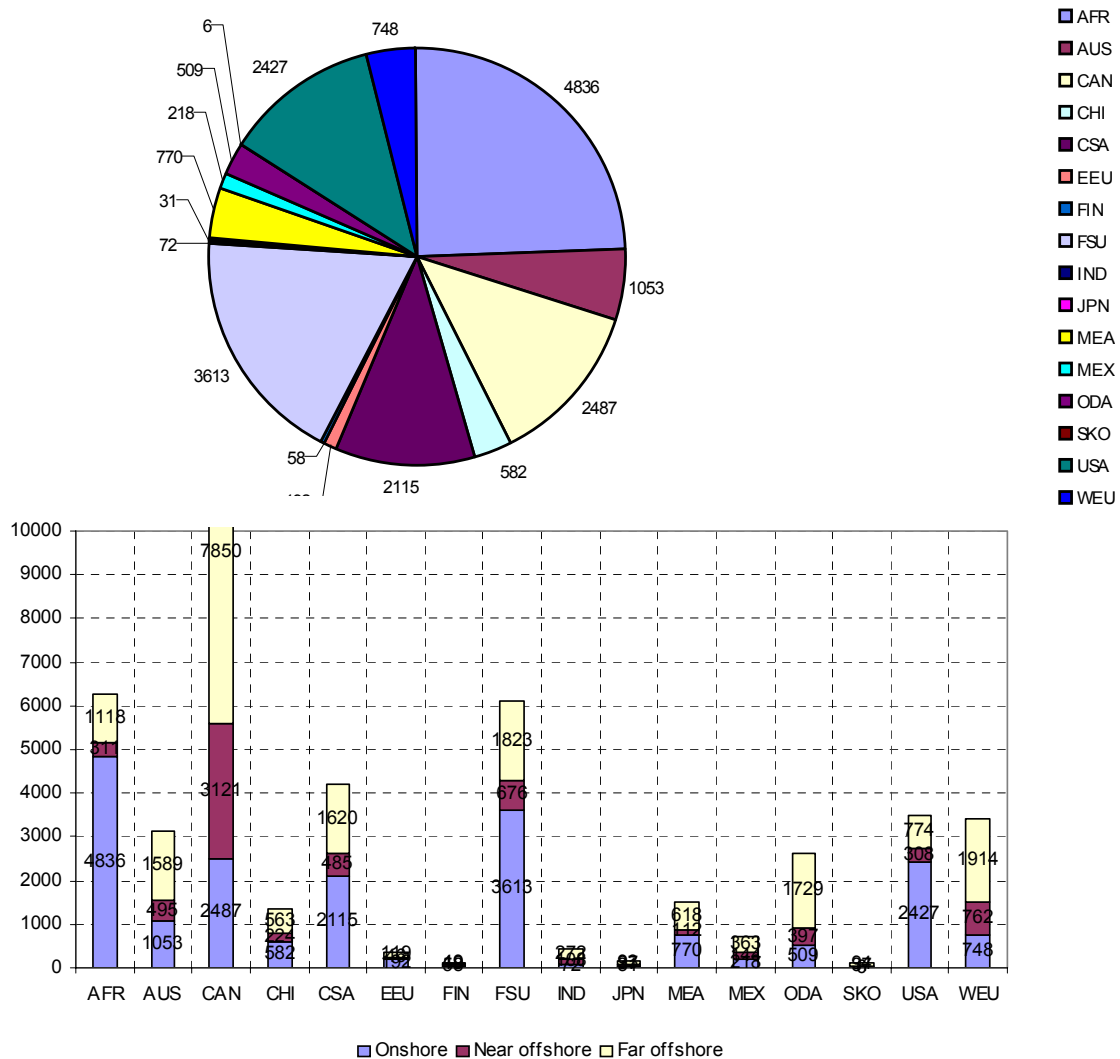


Kuva 5. TIMES-skenaarioissa käytetty maksimi bioenergiapotentiaali pitkällä aikavälillä perustuen lähteeseen Hoogvijk 2004 ja VTT:n kriittinen arvio bioenergiapotentiaalista alueittain.

2.4.3 Tuulienergiapotentiaalit

SETELI-hankkeessa muodostettiin globaali tietokanta, jossa arvioitiin maittain tuuliolosuhteet ja niiden esiintyminen. Tuuliolosuhteiden arvioinnissa käytettiin useita lähteitä ja tietokantoja, kuten European Wind Atlasta, Suomen tuuliatlasta, Russian Wind Atlasta sekä yhdysvaltalaisia National Renewable Energy Laboratoryn (NREL) tuuliatlasta ja Stanford Universityn Global Wind Potential -arvioita. Potentiaaliarvioissa kartoitettiin käytettävissä olevat maa- ja merialueet ja annettiin ylärajat maa- ja merituulivoimalle alueittain. Tuulivoimapotentiaalit määriteltiin tuuliluokittain: maa-alueiden osalta huomioitiin viisi tuulisuusluokkaa (luokat 3–7), ja maksimituulivoimamäärä suhteutettuna maan pinta-alaan oli 70 kW/km^2 , joka on itse asiassa pienempi kuin nyt jo rakennettu määrä Tanskassa, Hollannissa ja Saksassa. Maalla asennustiheys ”tuulipuiston” alueella voi olla jopa 10 MW/km^2 , kun taas merellä tiheys on jätettävä pienemmäksi. Oletetulla asennustiheydellä käytännössä hyödynnettäisiin alle yksi prosentti tuulisista maa-alueista. Merelle rakennettaville tuulivoimaloille huomioitiin neljä tuulisuusluokkaa (luokat 4–7), ja merituulivoiman ylärajan määrittelyssä huomioitiin rantaviivan pituus (nearoffshore) ja merialue 12 merimailin päähän, ja lisäksi oletettiin, että enintään kaksi prosenttia pinta-alasta voi olla tuulivoima-alueita. Arktiset merialueet eivät olleet mukana merituulivoiman potentiaalissa. Asennustiheydeksi merellä oletettiin 7 MW/km^2 . Lisäksi tuulivoiman ei sallittu ylittää 35 prosentin osuutta sähkön kokonaistuotannosta minään vuorokauden- tai vuodenaikana. Kuvassa 6 esitetään TIMES-skenaarioissa käytetyt tuulivoiman maksimituotantomahdollisuudet maalla ja merellä eri maantieteellisillä alueilla.

Maksimituotantomahdollisuus maalla TWh/a

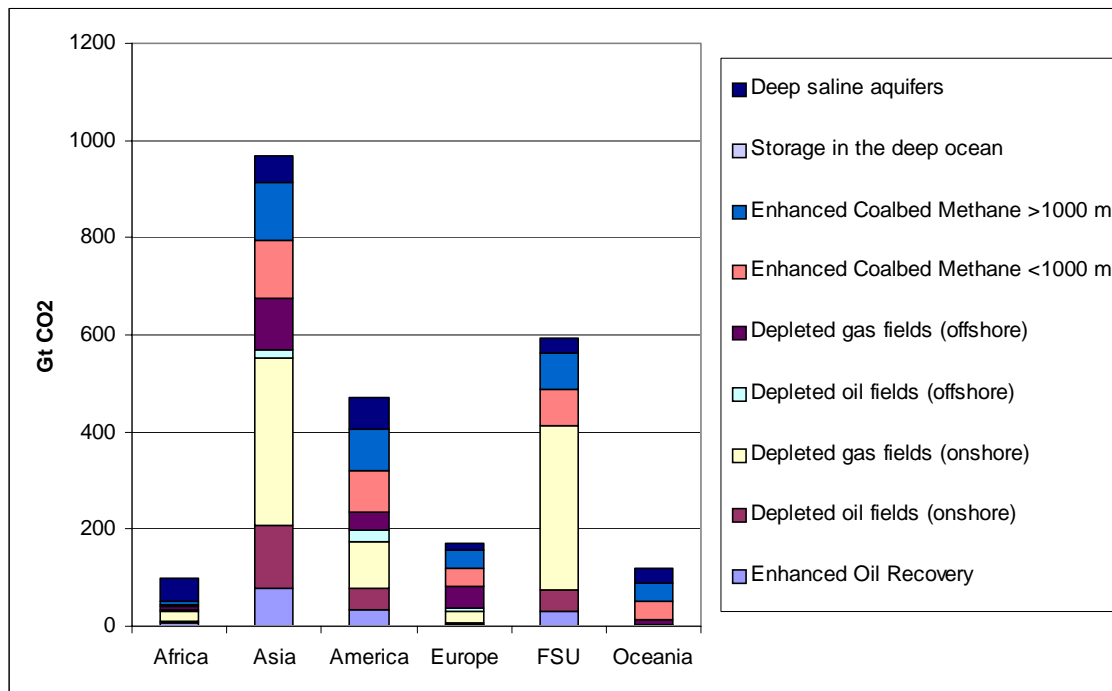


Kuva 6. TIMES-skenaarioissa käytetyt tuulivoiman maksimituotantomahdollisuudet maalla ja merellä eri maantieteellisillä alueilla.

Vuoden 2005 investointikustannustaso oli 1 100–1 200 €/kW maalle ja 1 500–1 600 €/kW merelle (ks. myös kohta 2.4.5 ja kuva 9). Investointikustannusten aleneminen riippuu siitä, kuinka paljon tuulivoimaa rakennetaan. SETELI-skenaarioissa oletuksena käytetty viiden prosentin kustannusalenemaa, kun tuulivoimamäärä kaksinkertaistuu. Vuonna 2030 kustannusten on arvioitu alenevan 20–30 prosenttia maalla. Tuulivoimapotentialiarvioissa oletettiin, että tuulivoiman vaatimat sähköverkkovahvistukset pystytään hoitamaan osana siirtoverkon suunnittelua. Osassa alueita siirtoverkon vahvistaminen tai lisärakentaminen saattaa aiheuttaa lisäkustannuksia, joita ei ole tässä huomioitu. Tuulivoima lisää lyhytaikaisen säädön käyttöä, minkä on kuitenkin oletettu pysyvän kohtuullisena (Holttinen et al. 2007).

2.4.4 Hiilidioksidin loppusijoituspotentiaali

Ilmastonmuutoksen hillinnässä hiilidioksidin erotuksella ja pitkäaikaisella varastoinnilla on arvioitu olevan merkittävä rooli tulevaisuudessa. CO₂:ta voidaan varastoida geologisiin muodostelmiin, kuten vanhoihin öljy- ja kaasulähteisiin, suolavesikerrostumiin tai kivihiilikerrostumiin. Lisäksi maailmalla on tutkittu CO₂:n varastointia valtamerien syvänteisiin, vaikka siihen liittyy merkittäviä ekologisia epävarmuustekijöitä. Varastointipotentiaaleista on esitetty kirjallisuudessa hyvin karkeita globaaleja arvioita, ja alueellisella tasolla tietoa ei välttämättä ole lainkaan saatavissa. Ainoastaan Euroopan, Pohjois-Amerikan ja Australian mannerten geologisten muodostelmien varastointipotentiaalit tunnetaan hieman paremmin lukuun ottamatta varastointia suolavesikerrostumiin. Skenaariolaskelmissa ei oletettu tapahtuvan varastointia valtameriin. Kuvassa 7 esitetään TIMES-skenaarioissa oletetut varastointipotentiaalit. Oletettu globaali kokonaisvarastointipotentiaali oli noin 2 400 Gt CO₂. Kirjallisuudessa esitetyt vastaavat potentiaaliarvot ovat yleisesti 500–5 000 Gt CO₂. Suurin epävarmuus liittyy varastointiin suolavesikerrostumiin. Kivihiilikerrostumiin varastoinnin osittain epäonnistuneet demonstraatiot ovat myös herättäneet epäilyksiä kyseisen varastoinnin mahdollisuuksista tulevaisuudessa.

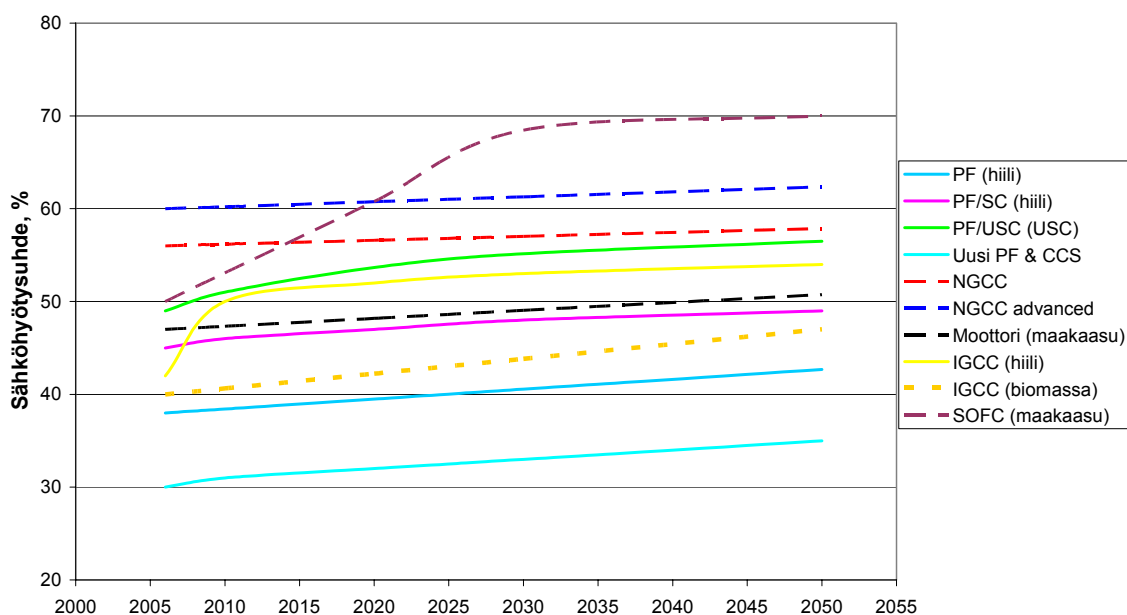


Kuva 7. TIMES-laskelmissa oletettu CO₂:n varastointipotentiaali eri maantieteellisillä alueilla.

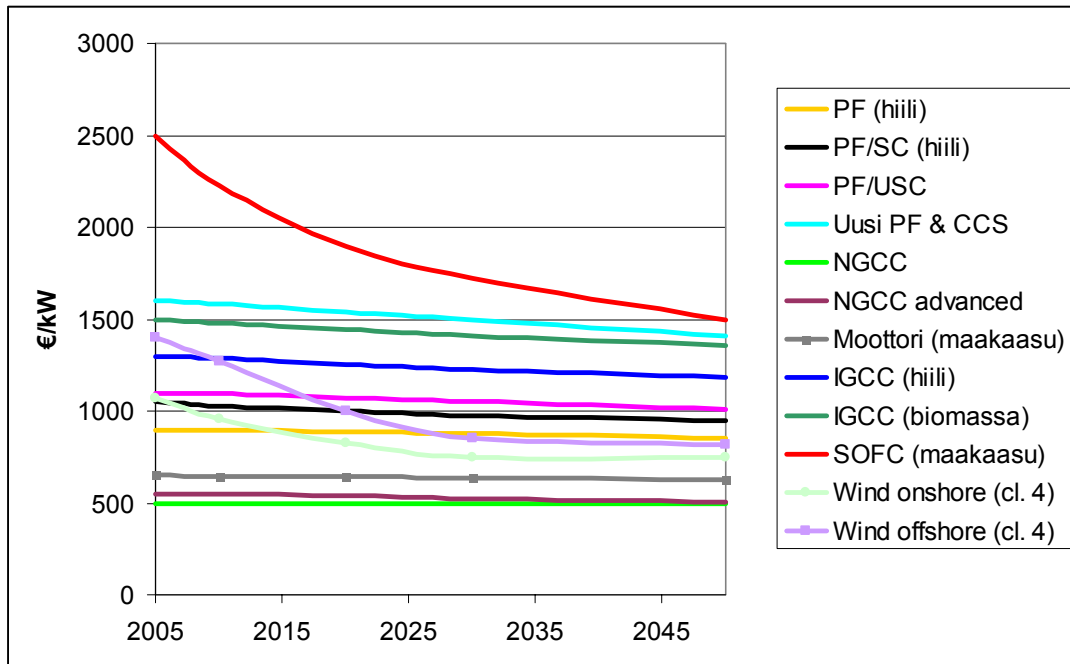
2.4.5 Teknologia skenaariot

Global TIMES -mallin keskeinen sisältö liittyy eri teknologioiden kuvauksiin. Tietokannassa on kuvattu nykyinen energiajärjestelmä, ja lisäksi tietokannassa on arviot laitojen poistumasta. SETELI-hankkeessa kehitettiin TIMES-mallin teknologiatietokantaa eli arvioitiin eri energiateknologioiden teknistä kehitystä (hyötysuhdetta, elinikää, jne.) sekä kustannusten kehitystä (investointi- ja käyttökustannuksia). Teknologioiden kehitystä arvioitiin kirjallisuuden perusteella ja lisäksi haastateltiin useita asiantuntijoita. Kuvissa 8 ja 9 esitetään esimerkinomaisesti valikoitujen voimalaitostyyppien sähköhyötysuhteiden ja investointikustannusten kehitykset. Tässä yhteydessä tulee huomioida, että SETELI-hankkeen edetessä muun muassa voimalaitosten investointikustannukset ovat olleet selkeässä nousussa. Kyseistä investointikustannusten nousua ei ole huomioitu arvioissa, vaan kustannustason on oletettu palautuvan hinnannousua edeltäneelle tasolle pitkällä aikavälillä.

Skenaariotarkasteluissa huomioidaan myös olemassa oleva energiainfrastruktuuri ja uuden infrastruktuurin rakentamisen aiheuttamat kustannukset. Nykyinen infrastruktuuri eri TIMES-alueiden välillä käsittää sekä sähkö- että maakaasuinfrastruktuurin (maakaasuputkisto ja LNG-terminaalit). Skenaariotarkasteluissa uusi infrastruktuuri voi edellisten lisäksi käsittää hiilidioksidi- tai vetyinfrastruktuurin.



Kuva 8. Esimerkkiarviot eri voimalaitostyyppien sähköhyötysuhteen kehityksistä TIMES-skenaariotarkasteluissa.



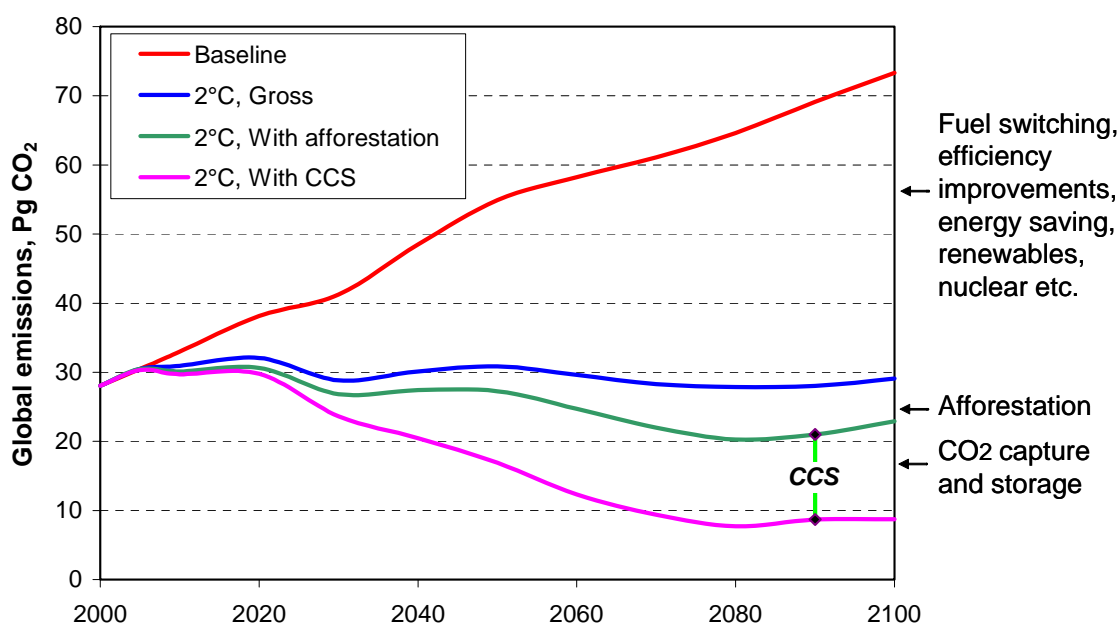
Kuva 9. Esimerkkiarviot eri voimalaitostyyppien investointikustannusten kehityksistä TIMES-skenaariotarkasteluissa.

Skenaariotarkasteluissa teknologiavalintoja ohjaavia tekijöitä ovat esimerkiksi oletukset energia- ja ilmastopolitiikasta (päästöjen rajoittaminen, ydinvoima, CO₂:n varastointi, tuet ja verot, jne.), markkinoista (esim. polttoaine-, sähkö-, päästöoikeusmarkkinoiden integroituminen) ja energiaressusseista (vrt. kohdat 2.4.1–2.4.3).

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Ilmastopolitiikan vaikutukset globaaliin ja alueellisiin energiajärjestelmiin

Global TIMES -skenaariotulosten mukaan kahden asteen tavoitteen saavuttaminen edellyttäisi khk-päästöjen vähentämistä noin kolmannekseen nykyisestä tasosta (vrt. kuva 10). Suurin osa khk-päästöjen vähennysinvestoinneista liittyy energiatehokkuuden lisäämiseen ja siirtymiseen vähäpäästöisiin energiatuotantomuotoihin. Sekä metsityksellä että hiilidioksidin erotuksella ja varastoinnilla (CCS) on myös merkittävä rooli khk-päästövähennystavoitteen saavuttamisessa. Baseline-skenaarioon nähden päästöjen vähentäminen tulisi aloittaa heti, ja viimeistään vuoden 2020 jälkeen khk-päästöjen tulisi kääntyä selvään laskuun. Liitteessä A esitetään Baseline-skenaarion päästöt hiilidioksidille, metaanille, dityppioksidille ja fluorikaasuille. Liitteessä A esitetään myös ilmakehän lämpötilan nousu sekä CO₂-päästöjen alueellinen jakautuminen Baseline- ja politiikkaskenaarioissa.



Kuva 10. Globaalit CO₂-päästöt Baseline- ja 2 °C:n politiikkaskenaarioissa.

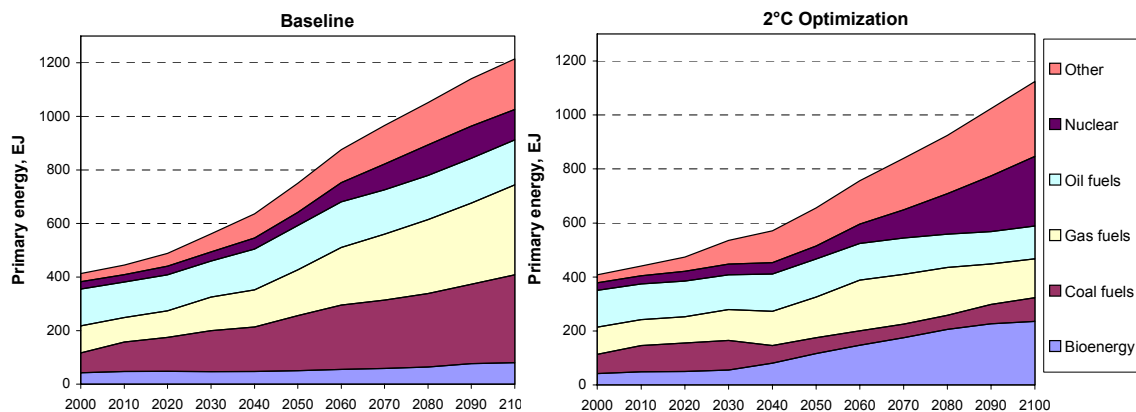
Kuvissa 11 ja 12 esitetään globaalit primäärienergian kulutukset sekä globaali sähkön-
tuotanto Baseline ja 2 °C -politiikkaskenaarioissa. Kuvassa 13 esitetään herkkyystarkas-
telu 2 °C:n politiikkaskenaariolle. Herkkyystarkasteluissa pienennettiin oletettua alueel-
lista tuuli- ja bioenergiapotentiaalia 40 prosenttia. Liitteessä A esitetään lisäksi loppu-
käyttöenergian kulutus alueittain sekä herkkyystarkastelut globaalille ja Länsi-Euroopan
sähkön-
tuotantoskenaarioille, joissa on vähennetty edellä mainittua uusiutuvan energian
potentiaalia 40 prosenttia tai CO₂:n loppusijoituspotentiaalia 50 prosenttia. Yhdessä

herkkyystarkastelussa oletettiin, että fuusio ei toteudu. Ilmastopolitiikan vaikutuksia simuloitiin lisäksi skenaariossa, jossa Annex-1-maille oli annettu päästökäytöt vuosille 2020 ja 2050 ja lisäksi investoinnit ei-Annex-1-maihin oli rajoitettu (vrt. kohta 2.1.2). Taulukossa 4 on yhteenveto eri laskentatapauksista.

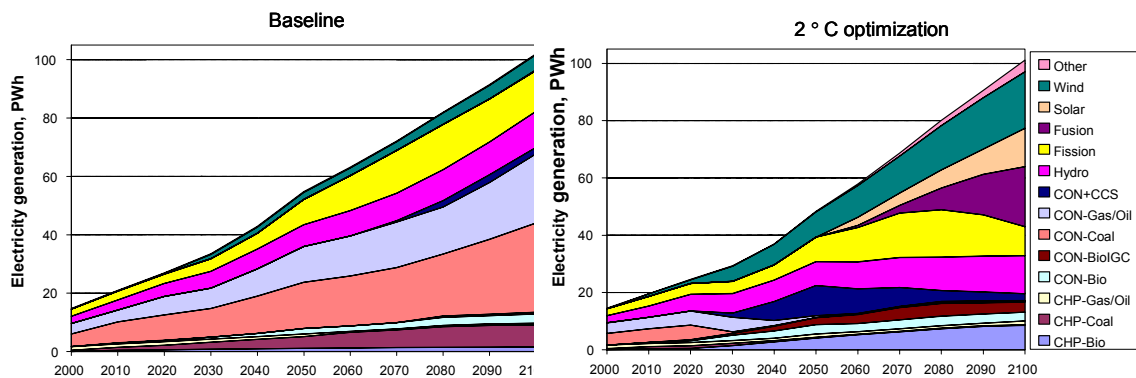
Taulukko 4. Yhteenveto laskentatapauksista.

Kuvaus	Nimi	Muuttujat
Perusskenaario, ei ilmastopolitiikkaa	Baseline	-
Politiikkaskenaario, jossa ilmaston lämpeneminen rajoitetaan 2 °C:seen	2 °C	Ilmakehän lämpötila kasvihuonekaasupäästöjen funktiona, globaali päästökauppa
2 °C -sken., jossa uusiutuvien potentiaali pienempi	Low renewables	Bioenergia- ja tuulivoimapotentiaalit -40 %, globaali päästökauppa
2 °C -sken. ilman fuusiota	No fusion	Fuusio ei sallittu, globaali päästökauppa
2 °C -sken., jossa CCS-potentiaali pienempi	Low CCS	CCS:n varastointipotentiaali -50 %, globaali päästökauppa
2 °C -sken., jossa teollisuusmailla on tiukemmat päästörajotukset ja CDM rajoitettu	CDM	1. Annex-1-mailla khk-päästöt 1990-tasoon verrattuna vuonna 2020 -20 %, 2050 -70 % ja 2090 -90 % 2. Annex-1-mailla CDM rajoitettu vuonna 2020 (maks. 20 %) ja vuonna 2050 (maks. 20 % tai 50 %)
Integroitu GTAP-TIAM-mallin käyttö Baseline & 2 °C -skenaarioissa	GTAP-TIMES	TIAM→GTAP: energian hintojen muutokset ja khk-päästöjen vähennysten marginaalikustannukset GTAP→TIAM: tuotantojen ja kulutusten muutokset

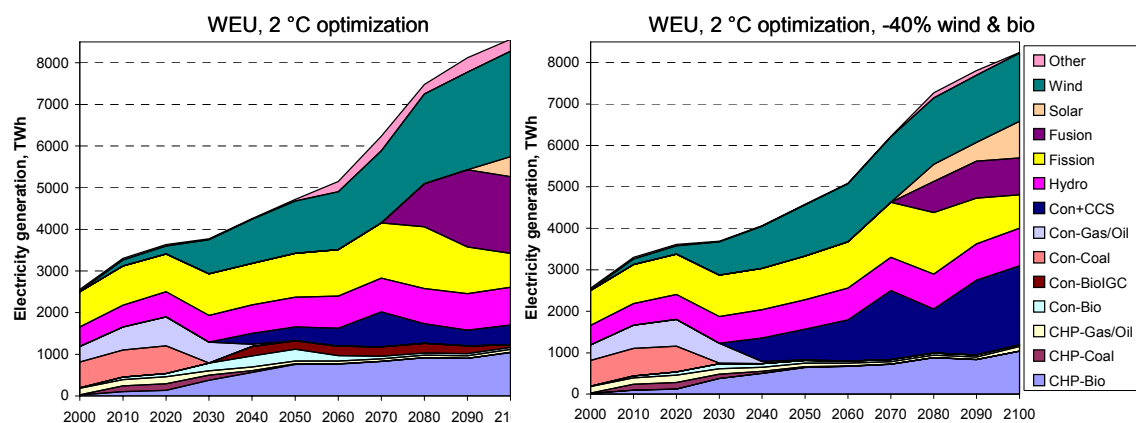
Tuloksista nähdään, että 2 °C politiikkaskenaarioissa bioenergian ja tuulienergian käyttö lisääntyy hyvin merkittävästi. Uusiutuvien energialähteiden käyttö Länsi-Euroopassa on vielä merkittävämpi kuin globaalisti keskimäärin. Tarkasteltaessa Länsi-Euroopan politiikkaskenaariota voidaan todeta, että tuulipotentiaalin pienentäminen 40 prosenttia vähensi selvästi tuulivoiman osuutta sähköntuotannossa. Sen sijaan bioenergian käyttö oli lähes sama, joten bioenergianresursseja jää peruspolitiikkaskenaariossa vielä käyttämättä. Pienentynyt tuulivoiman osuus korvautuu lähinnä hiilidioksidin erotuksella varustetulla laudetuotannolla. Sama ilmiö on havaittavissa laskentatapauksessa, jossa fuusioinvestointeja ei sallittu. Herkkyystarkasteluissa, joissa pienennettiin CCS:n loppusijoituspotentiaalia 50 prosenttia, ei havaittu merkittävää muutosta peruspolitiikkaskenaarioon nähden, joten CO₂:n varastointikapasiteettia jää 2 °C -skenaarioissa merkittävästi käyttämättä.



Kuva 11. Globaali primäärienergian kulutus Baseline- ja politiikkaskenaarioissa.

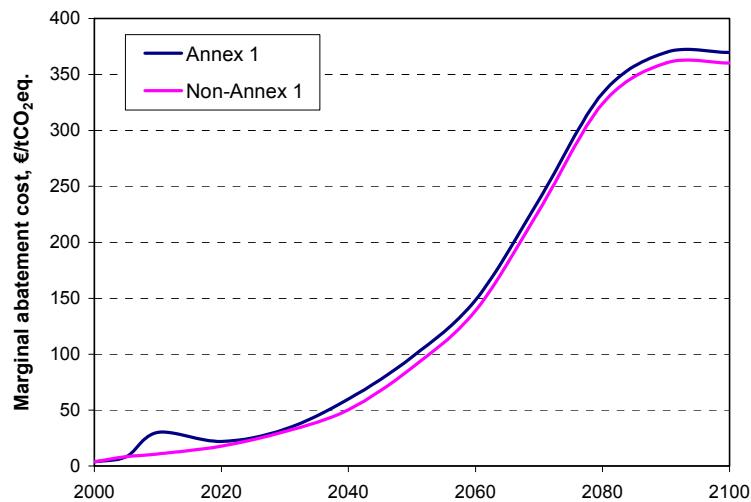


Kuva 12. Globaali sähköntuotanto Baseline- ja politiikkaskenaarioissa. ”Other”-sektori on pääasiassa polttokennoja.



Kuva 13. Sähköntuotanto Länsi-Euroopassa peruspolitiikkaskenaariossa ja politiikkaskenaariossa, jossa tuuli- ja bioenergiapotentiaaleja pienennettiin 40 prosenttia.

Simuloinnit CDM-politiikan vaikutuksista investointeihin osoittivat, että CDM:n käytön rajoituksella oli merkitystä vain ennen vuotta 2020 (vrt. kuva 14). Kokeilusimulointi, jossa vuonna 2050 asetettiin 20 prosentin CDM-katto Annex-1-maille, antoi lähes saman tuloksen kuin tapauksessa, jossa CDM-katto vuonna 2050 oli 50 prosenttia. Teoriassa kahden asteen tavoitetaso olisi siis riittävä vuoden 2020 jälkeen, jolloin suuri osa kehitysmaiden halvoista päästövähennyspotentiaaleista olisi jo toteutettu.



Kuva 14. Päästövähennysten marginaalikustannukset tapauksessa, jossa Annex-1-maiden päästövähennysinvestointeja kehitysmaissa rajoitettiin vuoteen 2050 asti. Transaktokustannukset Annex-1- ja ei-Annex-1-maiden välillä ovat 10 €/t CO₂. Vuonna 2010 Annex-1-maiden korkeammat marginaalikustannukset johtuvat tiukasta CDM-katosta (max. 10 prosenttia).

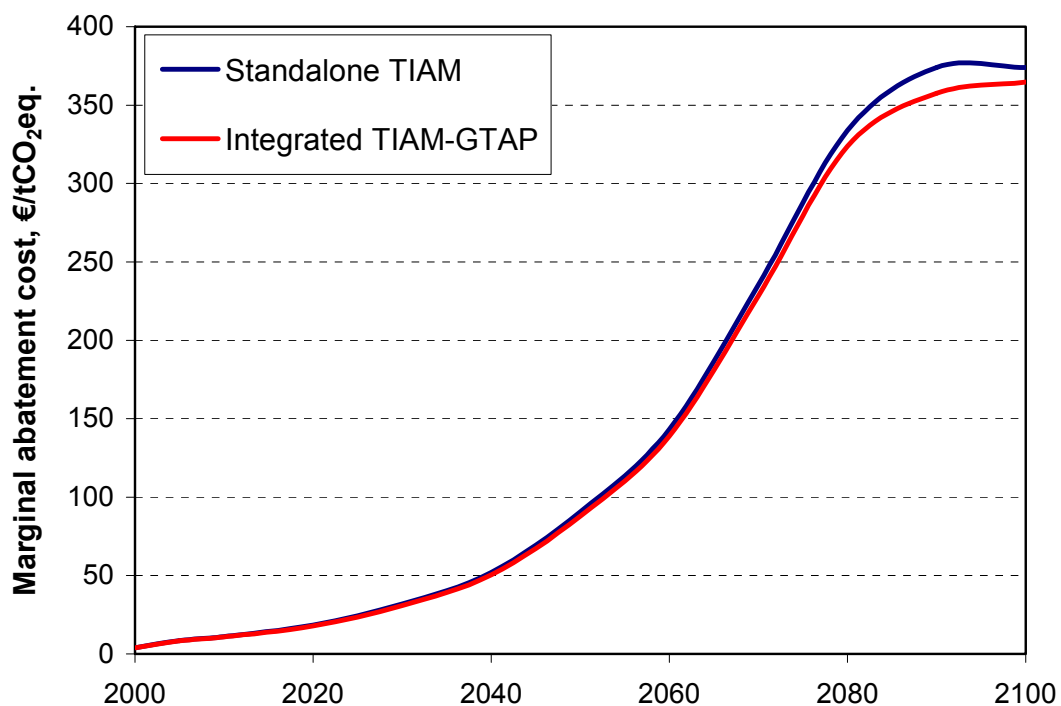
3.1.1 Integroidun GTAP-TIMES-tarkastelun tulokset

Integroidussa GTAP-TIMES-mallitarkastelussa käytettiin globaalia TIAM-osittaistasa-painomallia ja kokonaistaloudellista GTAP-mallia toisiinsa kytketyksi seuraavalla tavalla:

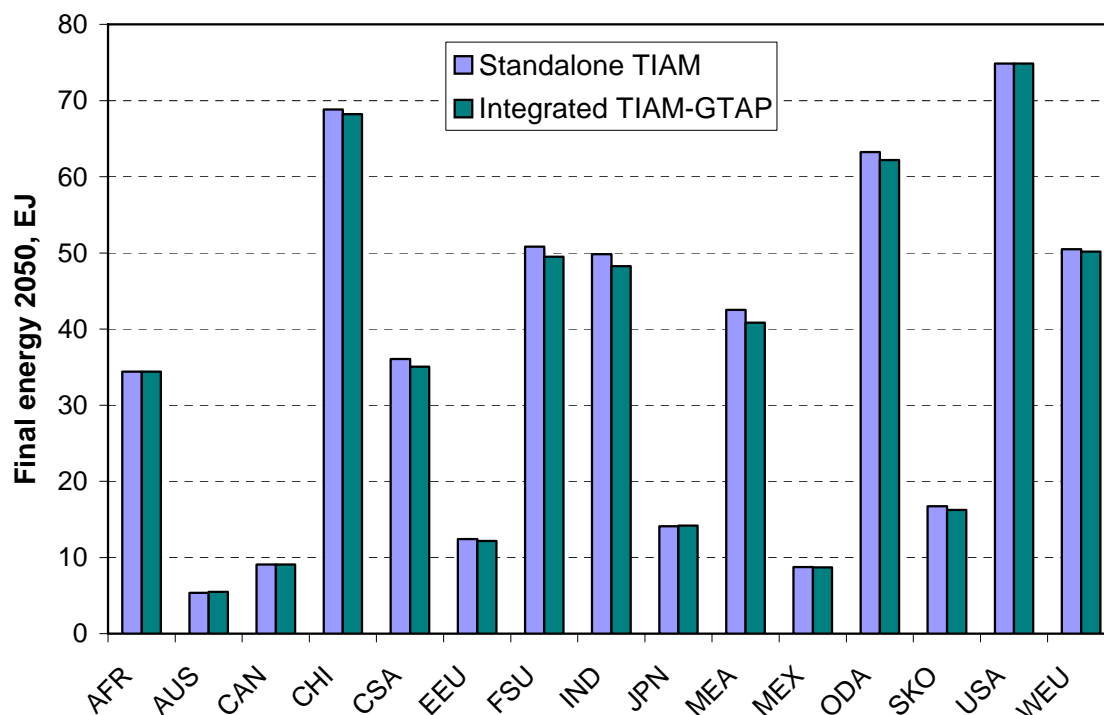
- TIAM-mallin tuottamia energian hintojen muutoksia ja päästöjen vähentämisen marginaalikustannuksia käytettiin lähtötietoina GTAP-mallissa, jolla laskettiin näiden hintamuutosten aiheuttamat vaikutukset kunkin alueen kansantalouteen kunkin tarkasteluvuonna 2010–2100.
- GTAP-mallin näin tuottamien sektorikohtaisten tuotannon ja yksityisen kulutuksen muutosten avulla laskettiin TIAM-malliin uudet kysynnän ajurien kehitykset vuoteen 2100. Näiden päivitettyjen ajuriskenaarioiden avulla laskettiin sen jälkeen uudestaan sekä Baseline-skenaario että 2 °C:n ilmastonmuutoksen rajoitus-skenaario.

Integroidun tarkastelun tulokset poikkesivat lopulta yllättävän vähän alkuperäisten itsenäisten TIAM-malliajajojen tuloksista. Kuvassa 15 esitetään päästöjen vähentämisen marginaalikustannusten kehitys integroidussa GTAP-TIMES-politiikkaskenaariossa verrattuna itsenäisten TIAM-ajojen tuloksiin. Vertailu havainnollistaa selkeästi, että TIAM-mallin tulokset poikkesivat integroidussa tarkastelussa globaalilla tasolla hyvin vähän alkuperäisistä tuloksista vuoteen 2050 saakka ulottuvalla jaksolla. Erot tulivat näkyvämmiksi vasta aivan vuosisadan lopussa, jossa päästöjen rajoitustoimet ovat tiukimpia ja marginaalikustannukset nousevat suurimmiksi. Mallien kytkennän vaikutusta tuloksiin on havainnollistettu myös kuvassa 16, jossa on esitetty energian loppukulutuksen alueellisia eroja vuonna 2050 integroidun ja alkuperäisen mallitarkastelun välillä. Erot jäivät kaikilla alueilla alle viiteen prosenttiin.

Integroidun tarkastelun tulokset ovat TIAM-mallin kannalta rohkaisevia siinä mielessä, että niiden perusteella TIAM-mallin voidaan arvioida tuottavan energiajärjestelmää koskevista muutoksista riittävän luotettavia tuloksia myös itsenäisesti käytettynä, vaikka kansantalouden kytkentöjä ei mallissa voidakaan ottaa huomioon. On kuitenkin muistettava, että tarkasteluissa käytettiin GTAP-mallin staattista versiota, joka ei ehkä kykene kuvaamaan kansantalouden rakenteellisia muutoksia riittävän hyvin pitkällä aikavälillä. Vastaavaa mallien integrointia olisi siten hyvä testata myös dynaamisella kokonaistasa-painomallilla.



Kuva 15. Päästöjen vähentämisen rajakustannukset 2 °C:n politiikkaskenaariossa käyttäen TIAM-mallia itsenäisesti ja integroidusti GTAP-malliin.



Kuva 16. Energian loppukulutus alueittain vuonna 2050 2 °C:n politiikkaskenaariossa käyttäen TIAM-mallia itsenäisesti ja integroidusti GTAP-malliin.

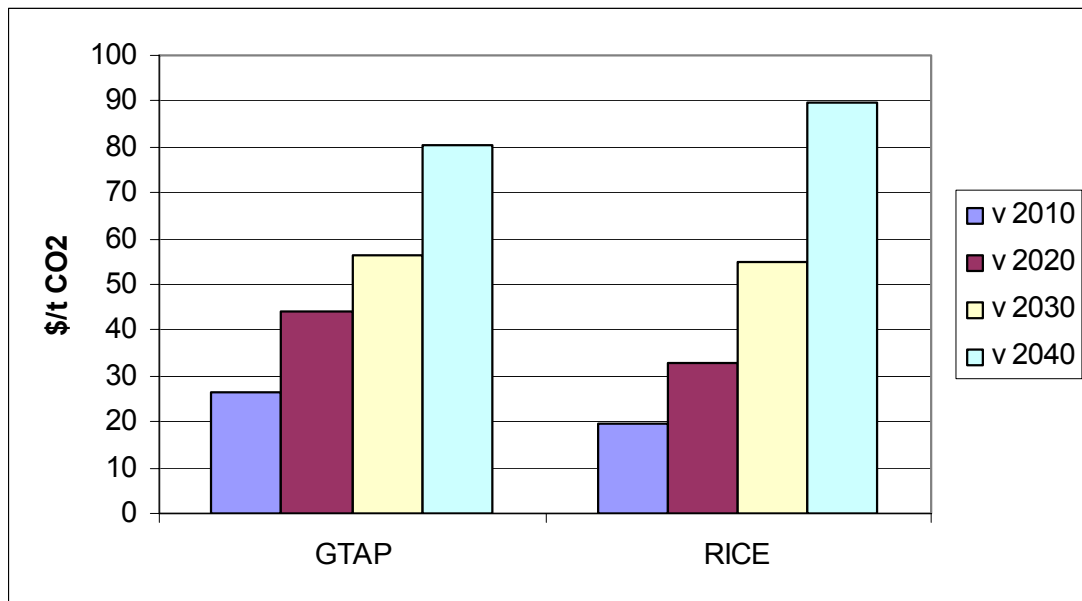
3.2 Ilmastopolitiikan vaikutus globaaliin ja alueelliseen talouteen

3.2.1 Päästövähennykset ja päästömaksu

RICE-mallin mukaan globaali päästövähennystarve olisi vajaat 40 prosenttia vuonna 2020, 46 prosenttia vuonna 2030 ja 60 prosenttia vuonna 2050 verrattuna Baseline-skenaarioon, jotta kahden asteen päästötavoite saavutettaisiin minimikustannuksin. Päästövähennykset alkavat RICE-mallissa välittömästi. RICE-mallissa vähennetään päästöjä aluksi enemmän kuin Global TIMES -mallissa, vaikka RICE-laskelmissa diskonttokorko on positiivinen ja sukupolvien välinen tasa-arvo otetaan huomioon. TIMES-mallin lähivuosikymmenien alempia päästövähennyksiä selittää mm. se, että olemassa olevien voimalaitosten käyttöä otetaan huomioon ja että uutta vähäpäästöisempää teknologiaa on myöhemmin käytettävissä pienemmin kustannuksin.

Kuvassa 17 esitetään RICE- ja GTAP-mallien tuottamat arviot päästömaksun suuruudesta, jotta kahden asteen tavoite saavutettaisiin. Päästövähennys on molemmissa sama, sillä GTAP-malliin asetettiin RICE-mallin tuottamat periodikohtaiset päästövähennykset. Vuonna 2030 globaalin päästöluvan hinta olisi näiden arvioiden mukaan yli 50 USD (2001) hiilidioksiditonnia kohti. Erityisesti RICE-mallissa päästövähennyksen rajakustannukset nousevat selvästi. IPCC:n arviot päästömaksusta vuonna 2030 vaihtelevat 20

80 dollariin hiilidioksiditonnilta, kun päästövähennystavoite on maltillisempi 550 ppm CO₂e. Vuodelle 2050 korkeimmat arviot ovat 155 dollaria.

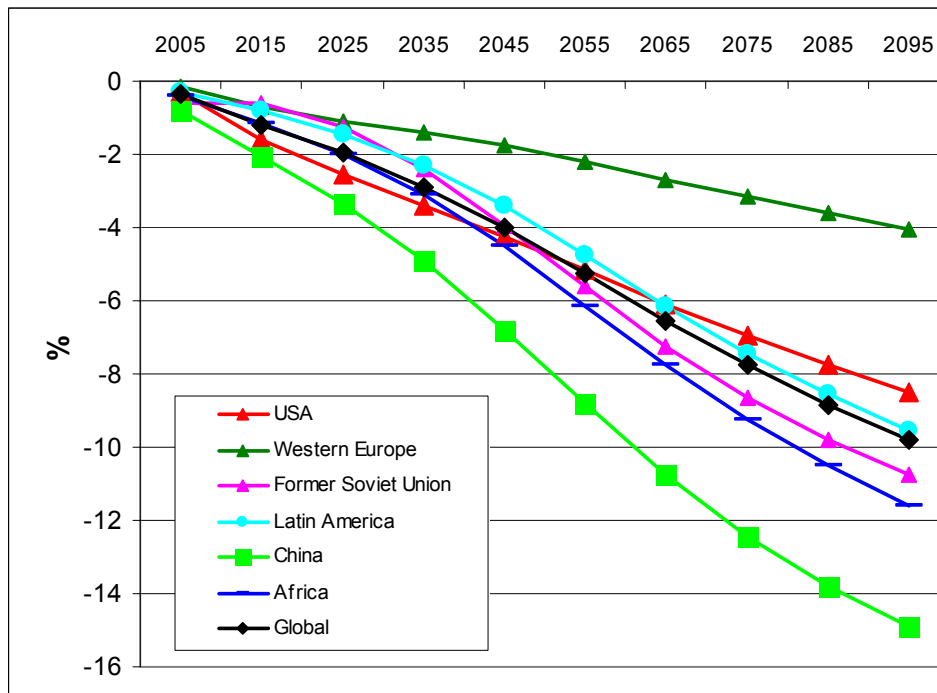


Kuva 17. Päästöluvan hinta USD/t CO₂.

3.2.2 Vaikutukset bruttokansantuotteeseen

Kuvassa 18 on esitetty päästörajoitteen vaikutus bruttokansantuotteeseen RICE-mallin mukaan. Kuvasta nähdään, että BKT alenee merkittävimmin nopean talouskasvun alueilla sekä kehitysmaissa, joissa päästöjen rajoittaminen on edullisinta. Vuonna 2020 BKT-tappio perusuraan verrattuna vaihtelee yhdestä kolmeen prosenttiin, vuonna 2030 reilusta yhdestä neljään prosenttiin ja vuonna 2050 kahdesta kahdeksaan prosenttiin. RICE-mallin tulosten mukaan BKT alenisi selvästi eniten Kiinassa. Myös Intiassa BKT-tappio on huomattava. Afrikassa ja Latinalaisessa Amerikassa kokonaistuotannon aleneminen jäisi lähivuosikymmeninä melko pieneksi. Sen sijaan Yhdysvalloissa BKT-tappio on globaalia muutosta suurempi vuoteen 2040 asti.

Kuvassa 19 esitetään GTAP-mallin tuottamat arviot bruttokansantuotteen muutokselle eri alueilla. Tulokset perustuvat laskelmaan, jossa GTAP-mallin sähkön ja polttoaineiden hintamuutokset on asetettu Global TIMES -mallin tulosten mukaisiksi. Vaikutukset kokonaistuotantoon selittyvät talouden sähkön ja polttoaineiden hintamuutosten suuruuden sekä sähkö- ja polttoaineintensiteetinsäilytyksen perusteella. Global TIMES -mallin tuottamat tulokset sähkön hintamuutoksista esitetään liitteessä B.



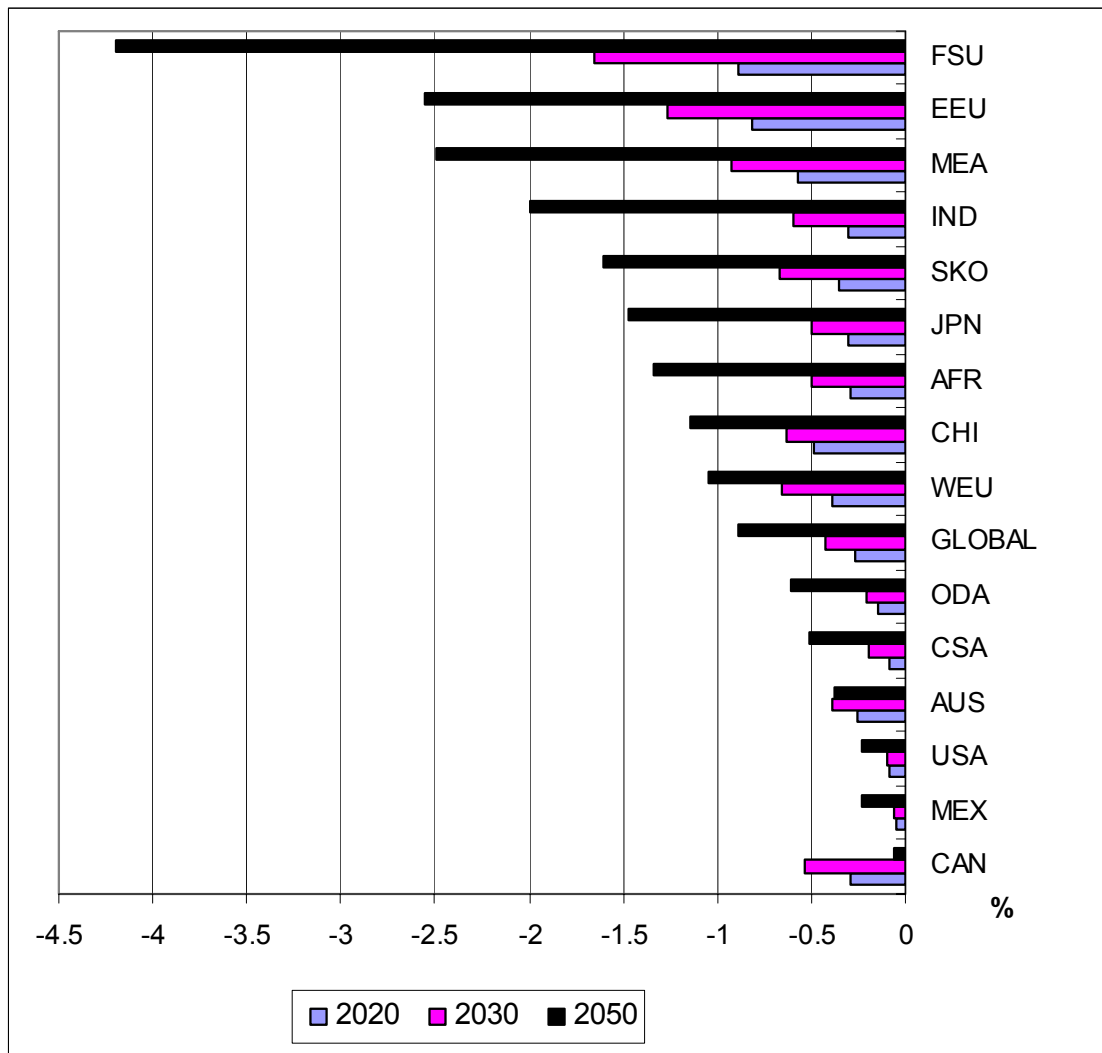
Kuva 18. BKT:n prosenttimuutos suhteessa Baseline-skenaarioon RICE-mallin mukaan.

Laskelman mukaan bruttokansantuote alenisi eniten entisen Neuvostoliiton alueella. BKT-tappio aiheutuu mm. öljyn ja kaasun vientitulojen alenemisesta sekä hintojen että määrien laskiessa. Tämä vaikutus näkyy myös Lähi-Idän kokonaistuotannon alenemisessä. RICE-mallin rajakustannusfunktiot eivät sisällä tätä vaikutusta. Myös Itä-Eurooppa on eniten kärsivien alueiden joukossa. Kiinassa puolestaan kokonaistuotannon pieneneminen on keskimääräistä tasoa. Intiassa BKT-tappio on merkittävä erityisesti vuonna 2050, kun taas Pohjois-Amerikassa BKT-tappio jäisi melko pieneksi. Yhdysvaltojen energiaintensiivisyys on GTAP-aineiston mukaan alhainen. Global TIMES-tulosten mukaan sekä Yhdysvalloissa että Kanadassa sähkön hinnan nousu jää vähäiseksi. Erityisesti Kanadassa tätä selittää huomattava uusiutuvan energian potentiaali. Kehittyvistä alueista Kiinassa ja Intiassa sähkön hinta nousisi keskimääräistä enemmän, koska fossiilisten polttoaineiden käyttö jatkuu pitkään. Kiinassa kuitenkin energia-intensiivisyys ei GTAP-aineiston mukaan ole korkea verrattuna muihin alueisiin.

Alueittainen bruttokansantuotteen aleneminen vaihtelee nolasta puoleentoista prosenttiin vuonna 2030 ja nollasta neljään prosenttiin vuonna 2050. Kokonaistuotanto ei siis kasva millään alueella. Alueiden järjestys kokonaistuotannon alenemisen suhteen eroaa jossain määrin vuosina 2030 ja 2050. Tämä johtuu siitä, että Global TIMES -mallin tuottamat sähkön hintasuhteet alueiden välillä ovat erilaiset vuosina 2030 ja 2050. Suhteellinen kustannusten nousu ja kilpailutilanne alueiden välillä on siis erilainen eri ajan-kohtina.

Globaalilla tasolla BKT alenisi vuonna 2050 vajaan prosentin Baseline-skenaarioon verrattuna. BKT-tappio on jossain määrin vähäisempi kuin Sternin raportissa (Stern 2007) esitetty arvio prosentin kokonaistuotannon alenemasta, sillä Sternin raportin arvio perustui lievempään päästövähennystavoitteeseen (500–550 ppm CO₂e). Sternin raporttia varten tehdyn kirjallisuuskatsauksen mukaan eri mallien tuottamat arviot olivat -2 prosenttia (nettohyöty) ja 5 prosenttia välillä pitoisuustavoitteiden vaihdellessa. IPCC arvioi neljännessä arviointiraportissaan (IPCC 2007) kokonaistuotannon alenevan vuonna 2030 alle 3 prosenttia ja vuonna 2050 alle 5,5 prosenttia, kun pitoisuustavoite on 445–539 ppm CO₂e. Näin matalien pitoisuustavoitteiden kokonaistaloudellisista vaikutuksista on kuitenkin vain vähän tutkimuksia. Pitoisuustavoitteella 535–590 ppm CO₂e BKT-tappion mediaani on 0,6 prosenttia. Kustannusarvioiden vaihteluväli kasvaa ajan kuluessa, koska epävarmuudet vähennyksen suuruudesta, teknologiapoluista ja politiikkatoimien tehokkuudesta lisääntyvät. Voimakkaatkaan päästölaskelmat eivät kuitenkaan vaaranna taloudellista kehitystä, sillä BKT on rajoiteskenaarioissa (l. politiikkaskenaariossa) selvästi korkeampi kuin nykyhetkellä. Lisäksi on huomattava, että toimimattomuuden kustannukset ovat arvioiden mukaan päästövähennyskustannuksia selvästi suuremmat.

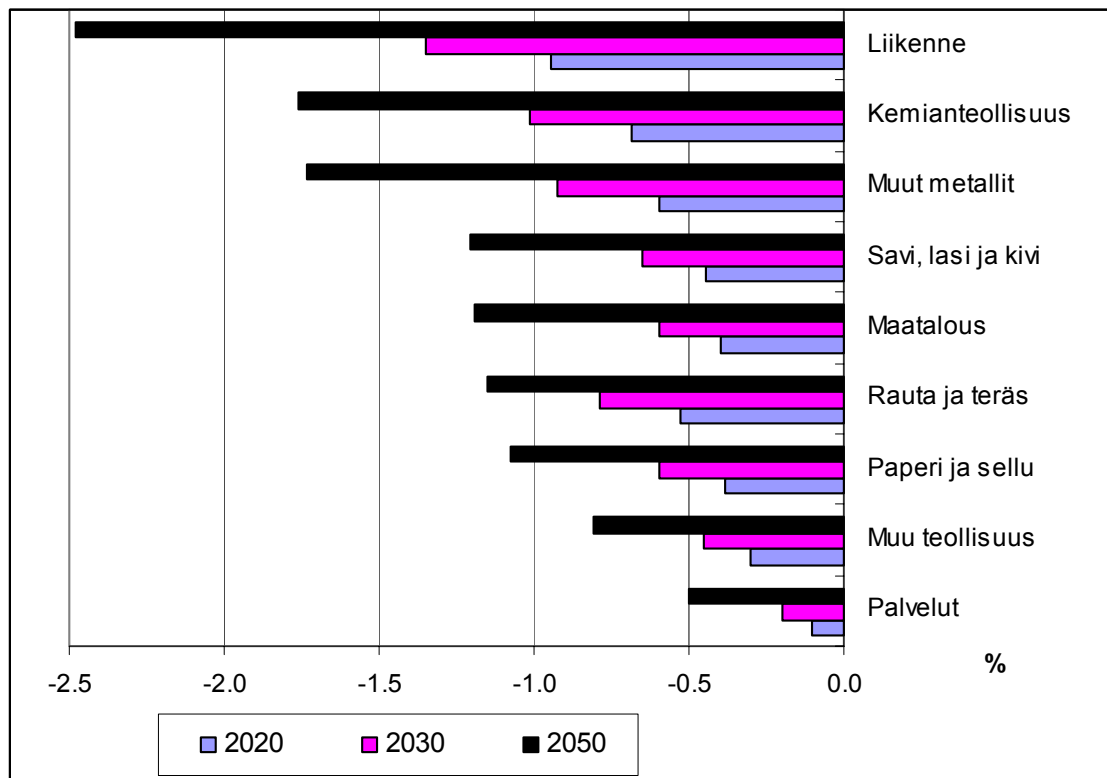
Tässä esitetyissä GTAP-TIMES-laskelmissa ei ole mukana päästökauppatuloja. Alueittaisten päästökauppatulojen ennustaminen on vaikeaa, sillä päästökauppajärjestelmän toteutus ja mahdollisesti ilmaiseksi jaettavien päästölupien jako alueittain tulevaisuudessa on auki. Yleisesti voidaan kuitenkin arvioida, että päästökauppatulojen huomioonottaminen pääsääntöisesti pienentäisi BKT-vaikutusta kehittyvillä alueilla niiden saadessa tuloja päästökauppatulojen myynnistä, kun taas päästökauppatuloja ostavien teollisuusmaiden BKT-tappiot kasvaisivat hieman. Päästökauppatulojen osuus kokonaistuloista ei kuitenkaan millään alueella nouse kovin suureksi. Päästökauppatulojen vaikutusta tarkastellaan julkaisussa Pohjola (2008).



Kuva 19. BKT-tappio Baseline-skenaarioon verrattuna vuosina 2030 ja 2050 lasketussa, jossa sähkön ja polttoaineiden hintamuutokset on otettu Global TIMES-mallista.

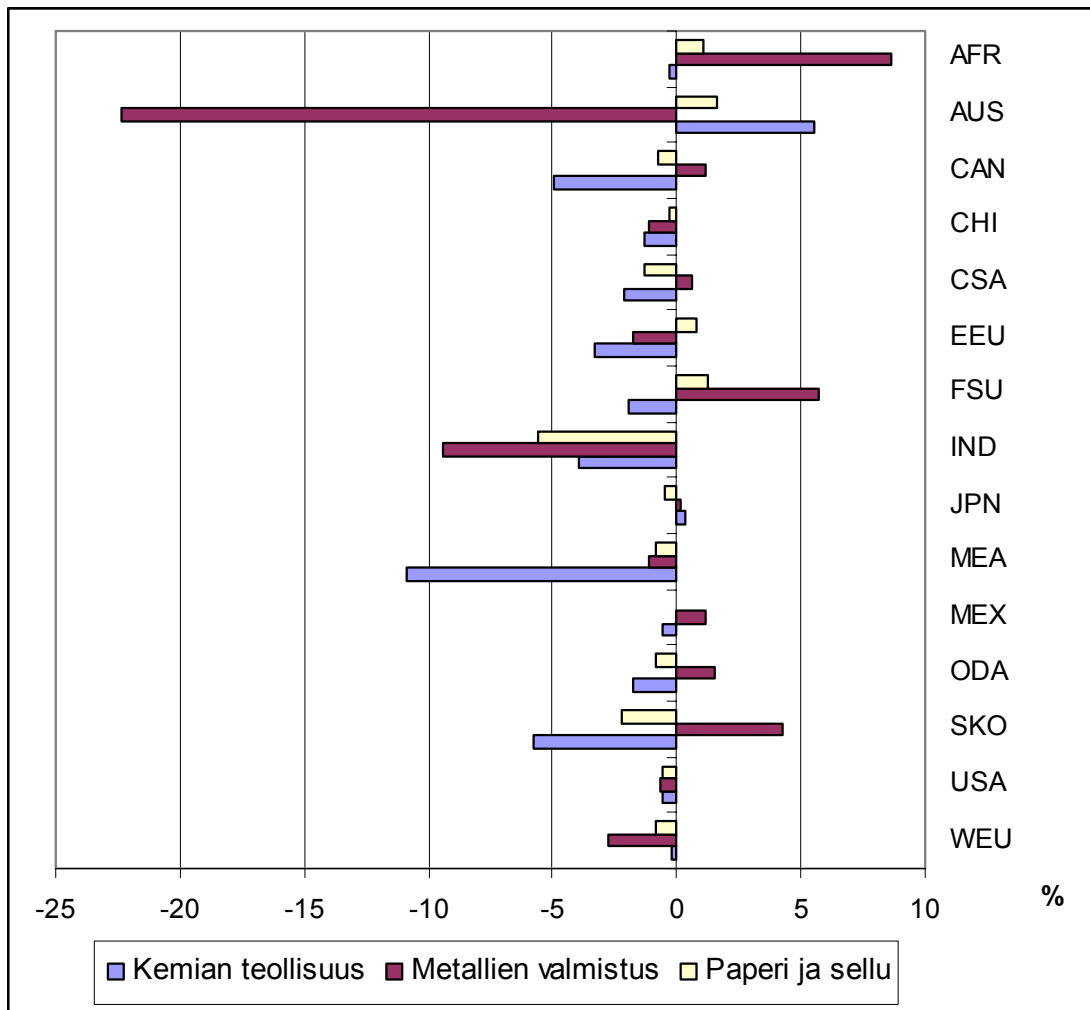
3.2.3 Vaikutukset sektorikohtaisiin tuotantoihin

Kuvassa 20 esitetään vaikutukset globaaleihin tuotannon määriin vuosina 2020, 2030 ja 2050. Sähkön ja päästömaksun sisältävien polttoaineiden hinnan nousujen muodostama kustannusrasitus toimialoille on Global TIMES -mallin tulosten mukainen. GTAP-tulosten mukaan kuljetussektori kärsisi eniten päästöjen rajoittamisesta. Tuotanto alenisi keskimääräistä enemmän myös mm. kemianteollisuudessa ja muiden metallien tuotannossa. Globaalilla tasolla tuotantojen muutokset jäävät kuitenkin melko pieniksi. Minkään hyödykkeen tuotanto ei kasva globaalilla tasolla. Tuotantopanoksia siirtyy kuitenkin energiantensiivisiltä sektoreilta palveluihin ja muuhun teollisuuteen. Tuotantosektorien järjestys pysyy lähes samana tarkasteltuina vuosina.



Kuva 20. Vaikutukset globaaleihin tuotantoihin Baseline-skenaarioon verrattuna vuosina 2030 ja 2050 GTAP-laskelmassa, jossa sähkön ja polttoaineiden hinnat nousevat Global TIMES -mallin tulosten mukaisesti.

Kuvassa 21 esitetään vaikutukset kemian teollisuuden, metallien valmistuksen sekä paperi- ja selluteollisuuden tuotantoihin eri alueilla vuonna 2030. Alueittaiset tuotannon muutokset ovat joillakin toimialoilla huomattavasti suuremmat kuin globaalien tason muutokset. Erot ovat suurimmat ei-rautapitoisten metallien tuotannossa, joka on GTAP-aineiston mukaan sähköintensiivisin sektori ja jossa erot kustannusrakenteessa ovat suuret alueiden välillä. Näiden laskelmien mukaan energiaintensiivisten sektorien tuotanto alenisi tarkasteluvuonna mm. Intiassa, Itä-Euroopassa ja Länsi-Euroopassa. Afrikassa ja entisen Neuvostoliiton alueella tuotannot kasvaisivat huomattavasti. Tuotantoa siirtyisi alueille, joissa tuotantokustannukset ovat alhaisemmat. Tuotannon uudelleenallokoitumista rajoittaa kuitenkin GTAP-mallissa se, että pääoman ja työvoiman ei sallita liikuvan alueelta toiselle. Alueittaiset tulokset ovat hyvin herkkiä sähkön hintasuhteille sekä GTAP-mallin kustannusrakenteille ja joustojen arvoille.



Kuva 21. Vaikutukset metallien valmistuksen, paperi- ja selluteollisuuden sekä kemian-teollisuuden tuotantoihin Baseline-skenaarioon verrattuna eri alueilla vuonna 2030.

3.3 Skenaariotulosten vertailu ja merkittävimmät epävarmuudet

Skenaariolaskelmien pitkistä aikajänteistä johtuen on ymmärrettävää, että tulokset sisältävät suuria epävarmuuksia ja ovat lähinnä suuntaa-antavia. Tulosten tarkastelussa tulisikin pikemmin kiinnittää huomio muutoksiin ja muutosten suuruuteen verrattaessa skenaarioita kuin absoluuttisiin lukuihin. Kokonaistaloudellisissa tarkasteluissa päästöjen vähennys toteutuu tyypillisesti energian kysynnän jouston kautta, kun taas energiajärjestelmätarkasteluissa päästövähennykset toteutuvat investoimalla vähäpäästöiseen teknologiaan ja kysynnän jouston osuus on huomattavasti pienempi.

Sternin raportissa (Stern 2007) taloudellisten mallien tuottamien kustannusten kannalta keskeisiksi tekijöiksi mainitaan mallien sisältämä joustavuus siten, että päästövähennykset voidaan toteuttaa niillä alueilla, sektoreilla, teknologioilla ja kasvihuonekaasuilla, joilla se

tulee edullisimmaksi, sekä oletukset teknologian kehittymisestä ja oppimisesta. Teknologian kehittyminen vaikuttaa osaltaan päästövähennysten optimaaliseen ajoitukseen. Sternin raporttia ja päästöleikkausten ajoitusta käsitellään myös laatikossa 1 sekä yksityiskohtaisemmin julkaisussa Liski (2008). GTAP-mallissa päästövähennykset voidaan toteuttaa joustavasti eri sektoreiden ja jossain määrin myös alueiden välillä. TIMES-malli puolestaan sisältää teknologian kehityksen ja oppimisen sekä päästövähennyksen toteuttamisen joustavasti kaikilla Kioton pöytäkirjan kasvihuonekaasuilla investoimalla vähäpäästöisempään teknologiaan, uusiutuviin energialähteisiin ja nieluihin. Koska GTAP-TIMES-mallikehikko sisältää kansantalouden päästövähennyskeinojen lisäksi energiasektorin lukuisat päästövähennyskeinot, on luonnollista, että BKT-tappio jää melko alhaiseksi tyypillisiin kokonaistaloudellisiin mallilaskelmiin verrattuna.

Kokonaistalouden kustannukset ovat tyypillisesti alhaiset malleissa, joissa talous sopeutuu kustannuksitta. GTAP-mallissa pääoma ja työvoima liikkuvat vapaasti sektorilta toiselle, mutta alueiden välillä ne eivät voi liikkua. Sekä RICE- että GTAP-mallien tuottamat tulokset ovat luonteeltaan pitkän aikavälin tuloksia, jotka eivät ota huomioon talouden sopeutumiskustannuksia. Lyhyen aikavälin kustannukset voivatkin olla huomattavia. Esimerkiksi, jos palkka ei jousta vaan talous sopeutuu työttömyyden kautta, kustannukset ovat moninkertaiset.

GTAP- ja RICE-mallit olettavat talouden olevan lähtötilanteessa rakenteeltaan optimaalinen. Tällöin talouteen kohdistuva shokki, kuten päästörajoite, merkitsee kustannuksia. Positiivisia ympäristövaikutuksia ei GTAP-mallissa ole otettu huomioon, RICE-malli sen sijaan sisältää kytkennän khk-pitoisuudesta talouden kasvuun.

GTAP-laskelmat eivät ota huomioon investointeja energiateknologiaan ja siten näille toimialoille aiheutuvia positiivisia tuotantovaikutuksia. Kokonaistalouden kustannukset tulevat siis tältä osin yliarvioituksi.

Epävarmuus ilmakehän herkkyuden suhteen vaikuttaa TIMES-skenaarioissa khk-päästöuraan politiikkaskenaariossa, jossa khk-päästötavoite on ilmaistu ilmakehän tasapainolämpötilana. Mikäli ilmakehän herkkyys onkin suurempi kuin oletettu 3 °C, päästöjä tulisi vähentää vielä enemmän ja vielä nopeammin kuin esitetyissä skenaarioissa. Toisaalta energian kysyntä ja khk-päästöt riippuvat talouskasvu- ja väestönkasvuennusteista. SETELI-hankkeen skenaarioissa väestönkasvuennuste on maltillinen ja talouskasvu nopeampi kuin esimerkiksi EU:n käyttämät ennusteet (vrt. esim. JRC 2007). Ilmastonmuutoksen vaikutuksia talouden kasvuodotuksiin on arvioitu ainoastaan RICE-skenaarioissa, ja on ymmärrettävää, että arviot vaikutuksista ovat hyvin karkealla tasolla. Jatkohankkeessa arvioidaan myös ilmastonmuutoksen vaikutuksia uusiutuvien energialähteiden potentiaaleihin sekä energian kysyntään.

TIMES-skenaarioissa ratkaisevassa roolissa on arviot eri teknologioiden kehityksistä. Tärkeintä on arvioida, miten eri teknologiat kehittyvät suhteessa kilpaileviin teknologioihin sekä kustannusten että teknisten ominaisuuksien osalta. Esimerkiksi kustannusten kehityksen konventionaalisilla teknologioilla voidaan olettaa olevan hidasta, mutta uusilla teknologioilla, kuten polttonennoilla, kehityksen nopeutta on hyvin vaikea ennustaa. Lämpimurto- ja lämpöteknologiat voivat myös ajaa energijärjestelmien kehityksen aivan uuteen suuntaan, jota ei luonnollisesti ole voitu ennustaa skenaarioissa.

Laatikko 1. Sternin raportti (ks. yksityiskohtaisemmin Liski 2008).

Sternin raportti on mittava ilmastopolitiikan kustannus-hyötyanalyysi, jonka tavoitteena on vastata kysymykseen ”kannattaako ilmastopolitiikka taloudellisesti?” Sternin raportissa arvioidaan, että toimimattomuudesta seuraa vähintään 5 prosentin globaali BKT:n pudotus, nyt ja ikuisesti. Pessimistisessä tapauksessa vaikutus on jopa 20 prosenttia tai enemmän. Toisaalta politiikan kustannukset, jotka syntyvät päästöleikkauksista ja poistavat pahimmat vaikutukset, voidaan rajata noin prosenttiin globaalista BKT:sta. Nämä luvut poikkeavat merkittävästi aiempien tutkimusten vastaavista luvuista. Ilmastonmuutoksen kustannukset ovat raportissa suuremmat kuin mihin on totuttu, ja toisaalta päästöleikkaukset ovat halpoja. Tästä johtuen raportti suosittelee aikaisia ja voimakkaita päästöjen leikkaustoimia, kun taas aiempi tutkimus painottaa asteittain lisääntyvää panostusta ilmastopolitiikkaan.

Mikä selittää raportin poikkeavat tulokset? Kiistanalainen osio on luku 6, joka on raportin taloudellisen analyysin ydin. Tässäkin osiossa raportti ei poikkea aiemmasta tutkimuksesta dramaattisesti siinä mielessä, että käytetty analyysin apuväline on taloudellisen kasvun malli, johon on lisätty ilmasto-ongelmaa kuvaavaa ”luonnontieteellinen” osa. Erot aiempaan selittyvät tapaan, jolla raportti arvottaa ilmastonmuutoksen vaikutuksia kaukana tulevaisuudessa. Sternin oletuksista seuraa hyvin alhainen reaalin markkinakorko ja korkea säästämisaste. Sternin oletukset sallivatkin kritiikin mukaan liialliset uhraukset tänään tulevaisuuden hyväksi. Toisaalta leikkausten kustannukset lasketaan mukaan vain 50 ensimmäisen vuoden osalta. Osoittautuu, että raportin analyttisen työkalun tuottamat tulokset palautuvat pitkälti perinteisiksi, kun vaikutusten arvottaminen korjataan vastaamaan aiempaa käytäntöä. Raportin analyysi on johdonmukaista, kun nyt ymmärrämme mistä poikkeavat tulokset syntyvät. Lisäksi raportin päätulos, että *ilmastopolitiikka voidaan perustella taloudellisesti*, pitää paikkansa, vaikka jälkikäteisarviointin vaatimat korjaukset toteutetaan.

Raportti on rehellinen pyrkimys ymmärtää, kuinka ilmastopolitiikka voidaan perustella tänään, vaikka konkreettiset välittömät hyödyt eivät ole selvät. Tekijät ovat epäsuorasti pyrkineet korjaamaan perinteisen taloudellisen analyysin puutteita valitsemalla tulevaisuuden arvottamiseen vaikuttavat parametrit ”väärin”. Tekijöiden pyrkimys on oikea, sillä perinteinen kustannus-hyötyajattelu sopii huonosti ilmasto-ongelman tarkasteluun. Lähestymistapa tarjoaa taloudellista konkretiaa täsmällisten lukujen muodossa. Tarkasteltavaan ilmiöön liittyy kuitenkin liian suurta rakenteellista epävarmuutta, jotta se voitaisiin puristaa muutaman taloudelliseen tunnuslukuun. Poliittinen halukkuus tarttua ilmasto-ongelmaan heijastelee tarvetta ostaa välittömällä toimilla ilmastovakuutus epämääräisiä ja mahdollisesti katastrofaalisia riskejä vastaan. Näitä riskejä Sternin raportti pyrki hinnoittelemaan käyttäen hieman tarkoitukseen sopimatonta työkalua.

4. Suomalaisen puhtaan energiateknologian ja -palveluiden kysyntä

SETELI-hankkeen keskeisenä tavoitteena oli myös hahmottaa, millä energiateknologia- ja -palvelualueilla suomalaisilla toimijoilla voisi olla globaaleja liiketoimintamahdollisuuksia, kun huomioidaan tulevaisuuden mahdolliset syvät khk-päästöleikkaukset. Energian tuotantoteknologioiden kysyntää vuoteen 2050 asti on arvioitu Global Times -skenaariotulosten perusteella. Lisäksi on kartoitettu suomalaisen energiateknologian ja teknisen osaamisen vientiä JI- ja CDM-hankkeissa vuonna 2007, josta on ilmestynyt erillinen raportti (Laine 2008). Lopuksi on esitetty yhteenveto mahdollisista rahoitusratkaisuksista ja esitetty mahdollisia hankemekanismien kehityspolkuja. Kioton pöytäkirjan joustomekanismien kehitysnäkymiä on tarkasteltu myös SETELI-hankkeen osaraportissa (Ahonen 2006).

Gaia Groupin ja Finpron Tekesin ClimBus-ohjelmalle tekemässä selvityksessä (Vanhanen et al. 2006) on katsaus ilmastomarkkinoista ja alan suomalaisista toimijoista. Selvityksessä tunnistettiin noin 400 suomalaista teknologian toimittajaa, joista noin 100 toimi bioenergian teknologia-alueilla. Sekä energiatehokkuuden parantamisen että jätehuollon teknologia-alueilla toimi noin 40 yritystä ja 26 yritystä tuulivoiman teknologia-alueilla. Kymmenkunta yritystä toimi yhteensä polttokenno- ja vetyteknologian, aurinkoenergian sekä vesi- ja aaltovoiman teknologia-alueilla. CHP-kattiloiden ja -voimaloiden teknologia-alueilla tunnistettiin viisi yritystä (poislukien bioenergiaa koskevat sovellukset). Lisäksi tunnistettiin 50 erilaista palveluliiketoimintaa harjoittavaa yritystä, joista pääosa on suunnittelu- ja konsultointipalveluja tarjoavia yrityksiä, mutta mukana on myös ohjelmisto-, päästökauppa- ja muihin Kioton joustomekanismeihin liittyviä palveluja tarjoavia yrityksiä. Selvityksen mukaan nykyisten yritysten vientitoiminnan painopiste on Euroopassa, mutta toimintaa on myös Pohjois- ja Etelä-Amerikassa sekä Aasiassa.

Globaalit skenaariotarkastelut (vrt. esim. IEA WEO 2007) ja markkinaselvitykset ennustavat, että tulevaisuudessa investoinnit sijoittuvat yhä enemmän kehitys- ja kehittyviin maihin, johon tulisikin suunnata voimakasta markkinointia. Taulukossa 5 esitetään esimerkki Aasian markkinoista, joilla energiainvestointien kustannusten on arvioitu kasvavan lähes 180 miljardiin USD:iin vuoteen 2020 mennessä. Aasian puhtaan energian markkinoita on kuvattu tarkemmin projektin osaraportissa (Ronde 2008).

Vaikka SETELI-hankkeessa keskityttiin arvioimaan energiantuotantoteknologioiden kysyntää, ei tulisi unohtaa investointeja tulevaisuuden energiainfrastruktuuriin sekä energian käytön tehokkuutta lisääviin teknologioihin. Uusiutuvan energian hyödyntäminen edellyttää sähköverkkoinvestointeja samalla, kun nykyiset sähköverkot ovat tulossa käyttöikänsä päähän. Toisaalta kasvava maakaasun, kaukolämmön ja -jäähdytyksen käyttö sekä myöhemmin mahdollisesti CCS:n ja vedyn käyttö edellyttävät putki-

investointeja. Etenkin offshore-investoinnit voivat kasvaa merkittäviksi kaasujen ja mahdollisesti myös sähkön siirrossa. Toisaalta suurimman potentiaalinen khk-päästöjen pienentämisessä on arvioitu olevan energian loppukäytössä.

Taulukko 5. Energiainvestointien tarve Aasian maissa vuoteen 2020 asti, miljardia USD.

Maa	2001–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2020
Brunei	1,89	1,55	1,54	1,64
Kambodsa	0,19	0,97	0,68	0,61
Indonesia	17,11	30,45	43,05	63,98
Laos	0,47	3,82	4,14	1,17
Malesia	15,43	14,65	19,40	28,82
Myanmar	1,03	1,79	3,18	6,15
Filippiinit	2,94	5,87	8,16	12,65
Singapore	4,86	4,34	1,94	4,22
Thaimaa	13,22	15,80	22,52	34,15
Vietnam	8,78	14,84	19,77	23,32
Yhteensä	65,93	94,05	124,37	176,71

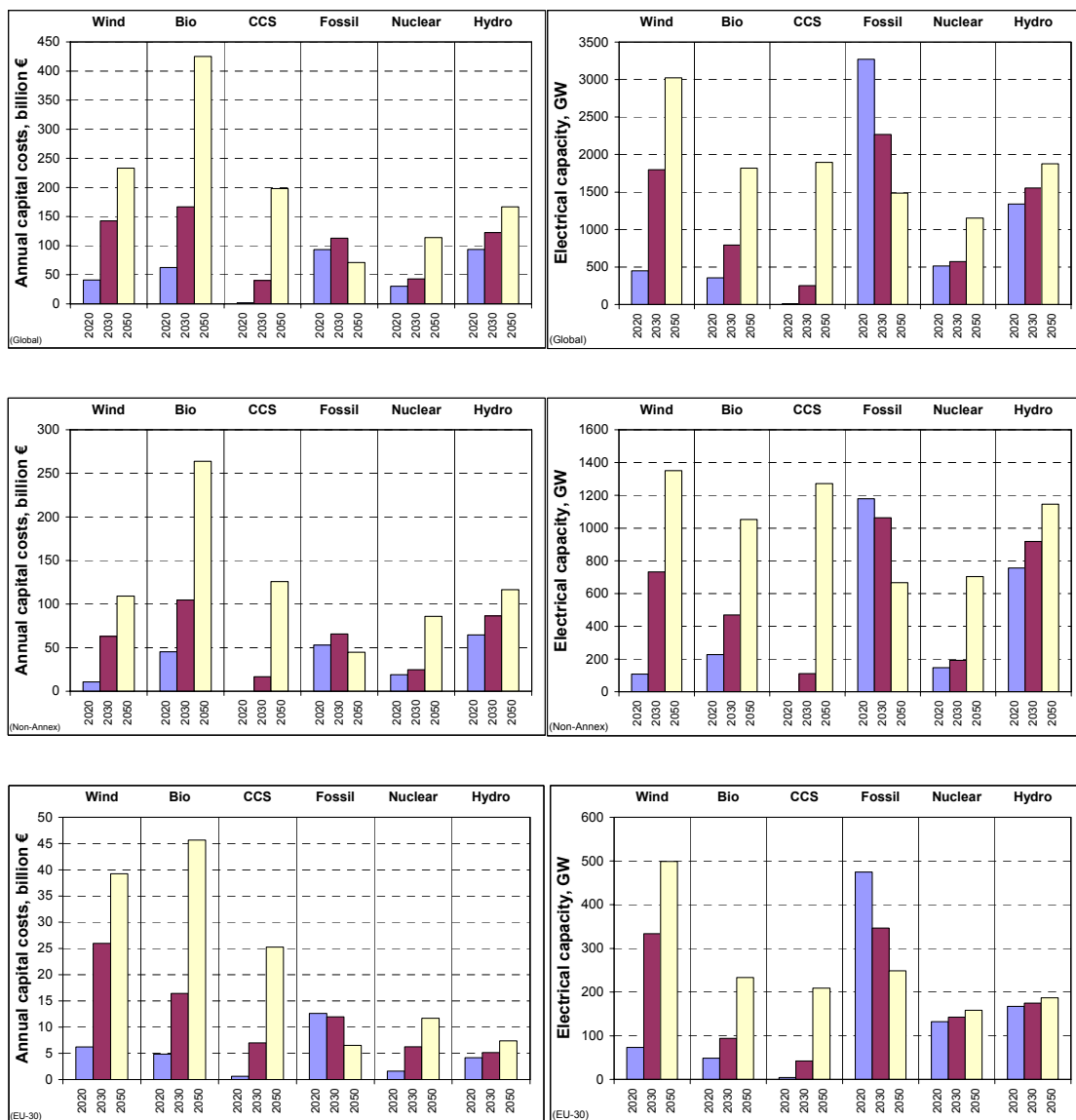
4.1 Arviot suomalaisen puhtaan energiateknologian kysynnästä tulevaisuudessa

4.1.1 Investoinnit teknologioihin Global TIMES -skenaarioissa

Luvussa 3 esitettyjä arvioita energiajärjestelmien kehityksestä voidaan hyödyntää myös arvioitaessa suomalaisen puhtaan energiateknologian kysyntää tulevaisuudessa. Koska skenaariotulokset sisältävät hyvin merkittäviä epävarmuuksia, kuvissa 22 ja 23 ei esitetä minkään yksittäisen teknologian tai maantieteellisen alueen investointeja.

Kuvassa 22 esitetään sähkön- ja lämmöntuotantokapasiteetit globaalisti, EU-30-alueella (vrt. kuvan 1 EEU+WEU-alueet) sekä ei-Annex-1-alueella politiikkaskenaariossa. Sähköntuotantokapasiteetista esitetään nimelliskapasiteetti, ja kapasiteettiluvuissa ovat mukana sekä olemassa oleva kapasiteetti että uudet investoinnit. Fossiilista polttoainetta ja biopolttoainetta käyttävien laitosten osalta luvuissa on mukana myös CHP-laitosten sähköntuotanto. Kustannuksista esitetään annualisoidut vuosikustannukset, jotka on laskettu kymmenen prosentin korolla ja olettaen laitoksen eliniäksi 20–30 vuotta laitostyyppistä riippuen. Globaalilla tasolla biopolttoainetta käyttävien laitosten kysyntä on selkeästi suurin etenkin pitkällä aikavälillä. Vuosina 2020 ja 2030 investoinnit tuuli-voimaan ovat lähes yhtä suuret. Arvioidut vuosikustannukset kasvavat politiikkaskenaariossa biopolttoainetta käyttävien laitosten osalta noin 50 miljardista eurosta vuonna 2020 yli 400 miljardiin euroon vuonna 2050. Kyseisistä yli 60 prosentin investoinneista

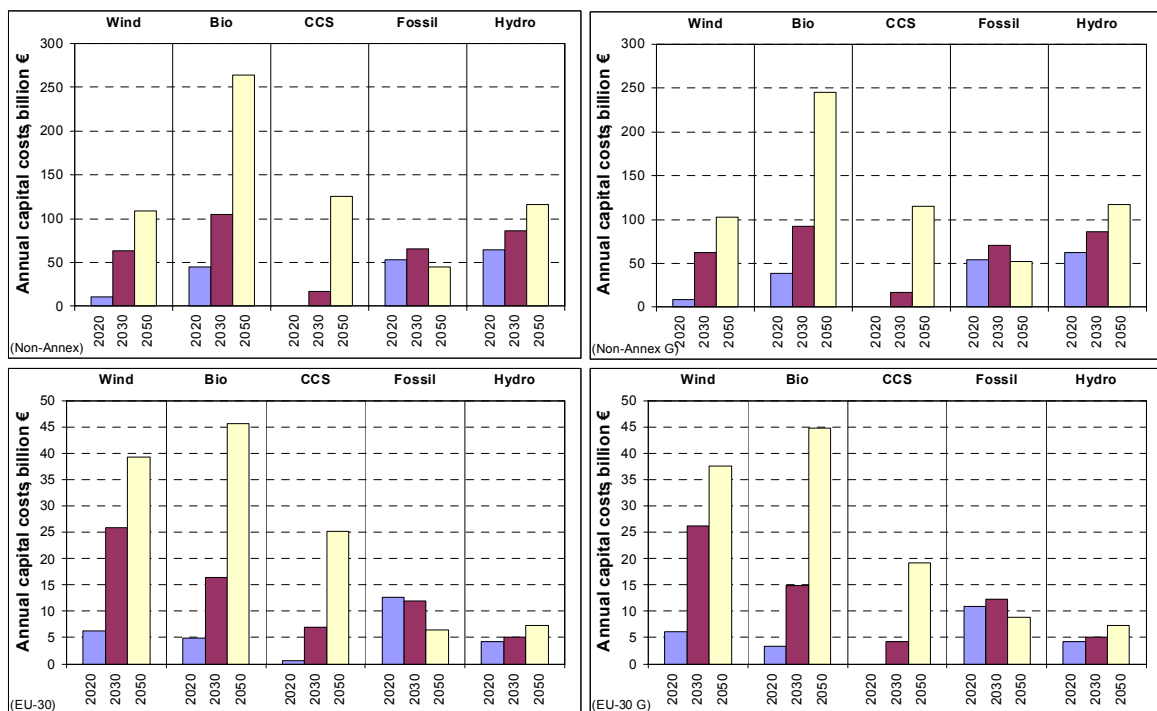
sijoittuu ei-Annex-1-maihin. Tuulivoiman vastaavat globaalit vuosikustannusluvut vaihtelivat noin 50 miljardista eurosta vuonna 2020 noin 240 miljardiin euroon vuonna 2050. Myös tuulivoimainvestoinneista yli 50 prosenttia sijoittuu ei-Annex-1-maihin. Fossiilisia polttoaineita käyttävien laitosten osuudet vuosikustannuksista olivat politiikkaskenaarioissa vuonna 2020 vielä suuremmat tai vähintään samaa suuruusluokkaa kuin biopolttoainetta käyttävien laitosten ja tuulivoimaloiden, mutta vuosina 2030 ja 2050 huomattavasti pienemmät. Fossiilista polttoainetta käytävillä laitoksilla, jotka on varustettu hiilidioksidin erotuksella, investoinnit sijoittuvat pääosin ei-Annex-1-maihin.



Kuva 22. Globaali, ei-Annex-1-maiden ja EU-30-alueen sähkön- ja lämmöntuotantokapasiteetit (nimelliskap., vanha & uusi kapasiteetti) sekä annualisoidut vuosikustannukset tuulivoimalle (wind), biovoimaloille ja lämpölaitoksille (bio), fossiilista polttoainetta käyttäville voimaloille CCS:llä (CCS) ja ilman (fossil) sekä vesivoimalle (hydro). 1 Billion € on 1 miljardi €.

Kuten kohdassa 3.1.1 jo todettiin, integroidun GTAP-TIAM-analyysin tulokset poikkeavat kokonaisuutena verrattain vähän itsenäisten TIAM-mallitarkastelujen tuloksista. Yksittäisiä energiatekniikoita koskevissa tuloksissa voidaan kuitenkin nähdä huomattavampiakin eroja. Kuvassa 23 on esitetty sähkön ja lämmöntuotantotekniikoiden vuosittaisten investointikustannusten vertailu alkuperäisten, itsenäisen TIAM-mallitarkastelun ja integroidun tarkastelun välillä 2 °C:n politiikkaskenaariossa vuosina 2020–2050 Ei-Annex-1-maissa ja EU-30:ssa.

Tulosten mukaan ilmaston muutoksen hillinnän aiheuttama kansantalouden kasvun hidastuminen johtaa jonkin verran osittaistasapainomallin antamia tuloksia pienempään bioenergiatekniikoiden ja CCS:n taloudelliseen potentiaaliin. Erityisen selvänä tulosten erot näkyvät CCS-teknikoiden käyttöönotossa Euroopassa, jossa investoinnit ovat talouskasvun hidastumisen takia lähes 25 prosenttia TIAM-mallin alkuperäisiä tuloksia pienemmät vuonna 2050. Globaalisti ero jää kuitenkin vain 10 prosenttiin. Yksittäisistä tuntuista alueellisista eroista huolimatta TIAM-malli näyttää tuottavan itsenäisesti käytettynäkin riittävän luotettavia tuloksia globaalilla tasolla.



Kuva 23. Ei-Annex-1-maiden ja EU-30-alueen sähkön ja lämmöntuotannon investointien vuosikustannukset tuulivoimalle (wind), biolaitoksille (bio), fossiilista polttoainetta käyttäville laitoksille CCS:llä (CCS) ja ilman (fossil) sekä vesivoimalle (hydro).

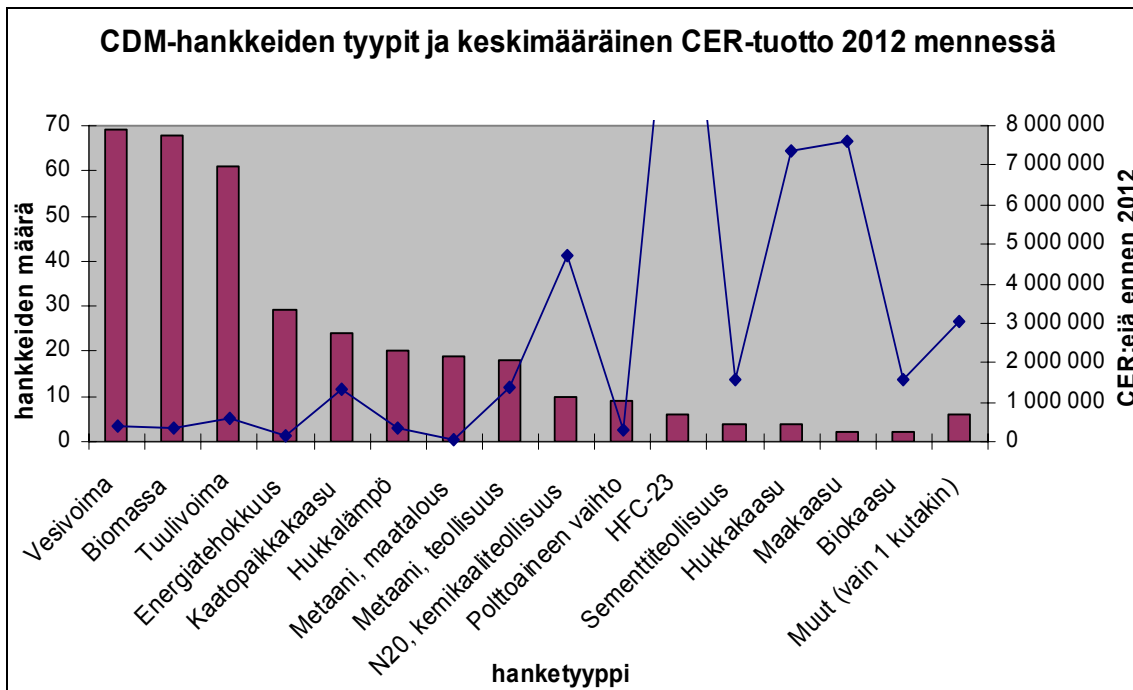
4.1.2 CDM- ja JI-hankkeet

Suomalaisella energiateknologian ja teknisen osaamisen viennillä on suuri potentiaali kehitysmaissa toteutettavissa CDM-hankkeissa. Useassa kehitysmaassa teknologian taso on vielä alhainen ja hankkeisiin joudutaan suurelta osin palkkaamaan laitetoimittajat energiateknologiaaltaan edistyneemmistä maista, kuten Suomesta ja muista Euroopan maista. Myös JI-hankkeissa suomalaiset laitetoimittajat ovat yleisiä, ja monissa Itä-Euroopassa toteutettavissa ja toteutetuissa hankkeissa on käytetty ja tullaan käyttämään suomalaista energiateknologiaa. Etuna JI-hankkeiden laitetoimituksissa suomalaisille toimijoille on kuljetusmatkojen lyhyys; esimerkiksi Venäjällä ja Virossa sijaitseviin hankkeisiin on Suomesta helppo toimittaa laitteita, kuten biomassakattiloita tai tuulivoimaloita.

CDM-hankkeiden yleisin hanketyyppi vuonna 2007 on ollut vesivoima (vrt. kuva 24). CDM:n alaisia vesivoimahankkeita on eniten Kiinassa ja Intiassa. Muita maita, joissa on merkittävä määrä vesivoimahankkeita, ovat Brasilia, Chile ja Etelä-Korea. Vuodesta 2005 lähtien on rekisteröity yhteensä 156 vesivoimahanketta maailmassa, ja ennätyselliset 518 vesivoimahanketta on tällä hetkellä UNEP Risøn mukaan validointivaiheessa. Tulevina vuosina vesivoimahankkeiden rekisteröinti tulee siis kasvamaan merkittävästi. Biomassahankkeet ovat vuonna 2007 olleet lähes yhtä yleisiä CDM-hankkeina kuin vesivoimahankkeet. Intiassa suomalaisen biomassateknologian viennin potentiaali arvioidaan Sitran raportin (Loikala et al. 2006) mukaan suureksi, sillä maassa on pulaa pienimuotoisista (1–2 MW) ja suurimuotoisista 25–50 MW) biomassakattiloista. Myös vientipotentiaalın kasvu tulevaisuudessa arvioidaan kohtalaiseksi tai suureksi. Muita maita, joissa biomassahankkeita on rekisteröity vuoden 2007 aikana, ovat esimerkiksi Kiina ja Thaimaa. Yhteensä vuodesta 2005 lähtien on rekisteröity 184 biomassan energia-käyttöön liittyvää hanketta maailmassa, ja 257 hanketta odottaa tällä hetkellä DOE:n validointia. Tuulivoima on vuonna 2007 ollut kolmanneksi yleisin CDM-hankkeiden tyyppi; tuulivoimahankkeita rekisteröitiin vuonna 2007 eniten Kiinassa ja Intiassa. Suomalainen tuulivoimateknologia on ollut kysyttyä maailmanlaajuisesti, myös CDM-hankkeissa. Tuulivoimahankkeet ovat CDM-hankkeina suosittuja; tällä hetkellä on UNEP Risøn mukaan yhteensä 119 rekisteröityä tuulivoimahanketta ja 192 tuulivoimahanketta on validointivaiheessa.

Myös JI-hankkeiden osalta tuulivoimahankkeet ovat olleet suhteellisen suosittuja vuonna 2007, sillä tuulivoima on ollut kolmanneksi yleisin hanketyyppi yhteistoteutushankkeissa. Energiatehokkuuteen liittyviä CDM-hankkeita voi olla useaa eri tyyppiä; ne voivat olla kotitalouksien, teollisuuden prosessien, tuotannon tai palvelujen energiatehokkuuteen liittyviä hankkeita. Hyvä esimerkki suomalaisesta alan osaamisesta on taajuusmuuttajat, jotka ovat muodostaneet suuren osan suomalaisen energiateknologian viennistä. Huomattavasti eniten energiatehokkuuteen liittyviä CDM-hankkeita on Intiassa; vuonna 2007 rekisteröidystä energiatehokkuushankkeista noin 82 prosenttia sijaitsee Intiassa.

Energiatehokkuushankkeita on rekisteröity UNEP Risøn mukaan tähän mennessä yhteensä 101 kappaletta ja 293 hanketta on validointiasteella. Energiatehokkuuteen liittyvät hankkeet ovat siis merkittävästi yleistymässä seuraavina vuosina, vaikka kaikkia validointivaiheessa olevia hankkeita ei rekisteröitäisikään.



Kuva 24. CDM-hankkeiden jakautuminen hanketyypeittäin (pylväs) ja hanketyyppien keskimääräinen CER-tuotto vuoteen 2012 mennessä (viiva). Tilanne 1.11.2007.

4.2 Palveluiden kysyntä

Ilmastonmuutoksen hillintä luo nopeasti kasvavat markkinat myös palveluliiketoiminnalle. Suomalainen kokemus energiatehokkaista prosesseista, kuten CHP-tuotannosta, sekä uusiutuvan energian hyödyntämisestä luo kilpailuetua suomalaisille suunnittelu- ja konsultointipalveluyrityksille. Toisaalta kansainväliset ilmastopöytäkirjat sekä EU:n toimenpiteet ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi toimivat ajavana voimana uudelle palveluliiketoiminnalle. Avautuvat energiamarkkinat, regulaatio päästöjen suhteen sekä energian kasvava hinta ja volatiliiteetti asettavat lisäksi uudenlaisia haasteita toimijoille, joiden tulee ymmärtää yhä useampien samanaikaisten ilmiöiden vaikutuksia. Tämä luo mahdollisuuksia myös ohjelmistojen kehittäjille ja myyjille sekä riskienhallinnan ammattilaisille.

Ilmastonmuutoksen hillintään liittyvä palveluliiketoiminta voi olla esimerkiksi konsultointia tai kasvihuonekaasupäästöjen mittaukseen, monitorointiin tai todentamiseen liittyvää koulutusta. Palvelut voivat liittyä myös päästöoikeuskauppaan tai teknologian

siirtoon liittyviin palveluihin (JI- ja CDM-projektit, GIS-projektit). Palvelut voivat kattaa esimerkiksi CDM- ja JI-hankkeille teknistä osaamista vaativia toteutus selvityksiä ja hankeasiakirjoja.

Energiatehokkuuden lisääminen tulee lähivuosikymmeninä kasvattamaan merkitystä. Suomalaisilla toimijoilla on kysyntää energia-auditointien ja energiansäästöön liittyvän konsultoinnin tuottajina maailmalla. EU:n energiapalveludirektiivi ja direktiiviehdotus energiatehokkuuden parantamiseksi tulevat kasvattamaan kysyntää energiamittausten, auditointien, ohjelmistojen ja muiden energiapalveluiden osalta.

4.3 Rahoitusratkaisut

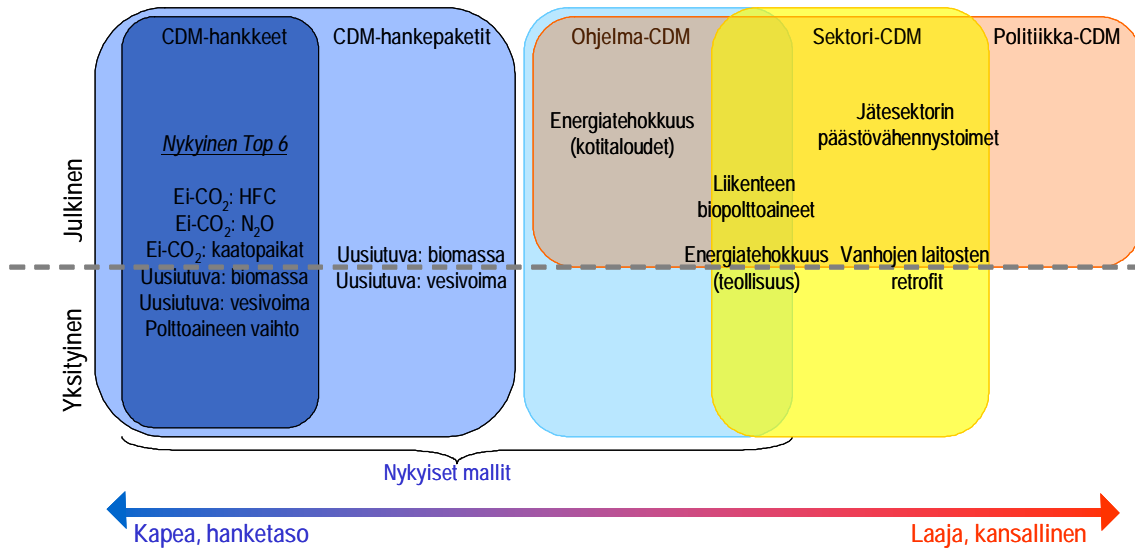
Rahoitus on useasti pullonkaula yritysten kansainvälistymisvaiheessa sekä viennissä. Lisäksi referenssilaitosten saaminen Suomeen on havaittu ongelmakohtaksi tiettyjen teknologioiden osalta. Suomessa on perinteisesti tuettu teknologian kehitystä, mutta teknologioiden ja palveluiden käyttöönotto ja levittäminen on jäänyt pienemmälle huomiolle. Cleantech-yritysten rahoitusmalleja ja rahoitusmarkkinoita on esitelty muun muassa SITRAn raporteissa (Linnainmaa & Teppo 2006, Teppo & Linnainmaa 2006, Hassinen et al. 2007). Tässä hankkeessa rahoitusratkaisujen painopiste oli arvioida lähinnä JI- ja CDM-hankemekanismin kehitystä.

Puhtaan kehityksen mekanismi on tällä hetkellä ainoa kanava, jonka kautta teollisuusmaat voivat käyttää kehitysmaissa toteutettuja päästövähennyksiä Kioton pöytäkirjan veloitteiden täyttämiseksi. Myös EU:n päästökaupan piiriin kuuluvat laitokset voivat hyödyntää puhtaan kehityksen mekanismia ja laajentaa sitä kautta järjestelmän kattavuutta. EU:n päästökauppa on toisaalta kaventanut yhteistoteutuksen potentiaalia tarjoamalla piirissään oleville yrityksille vaihtoehtoisen, vaivattomamman kaupankäyntikanavan. Kansallisten ja alueellisten päästökauppajärjestelmien kattavuuden lisääntyminen vähentää yhteistoteutuksen soveltamisalaa jatkossakin, ja yhteistoteutuksen rooli rajoittunee muiden järjestelmien ulkopuolelle jäävien alueiden ja sektorien linkiksi päästömarkkinoille.

4.3.1 Tulevaisuuden JI- ja CDM-politiikka

Nykymuotoinen, yksittäisiin hankkeisiin pohjautuva CDM pystyy realisoimaan vain murto-osan kehitysmaiden päästövähennyspotentiaalista eikä kykene luomaan riittäviä kannustimia kestävästä kehityksestä laajemmin edistävälle rakenteellisille uudistuksille. Mekanismin kattavuutta voitaisiin laajentaa merkittävästi sallimalla päästöjä vähentävien kansallisten ja sektoritason ohjelmien ja politiikkojen toteuttaminen CDM:n puitteissa. Kuvassa 25 ja laatikossa 2 esitetään nykymuotoiset CDM-mallit sekä mahdollisia tule-

vaisuuden CDM-elementtejä jaoteltuna viiteen eri kategoriaan. Nykymuotoisessa CDM:ssä on sovellettu lähinnä hankekohtaista, ns. bottom-up-tyyppistä lähestymistapaa. Ohjelma-, politiikka- ja sektori-CDM:ssä pyritään sen sijaan laajentamaan CDM-markkinoita soveltamalla ns. top-down-lähestymistapaa. Kyseisten lähestymistapojen väliset erot ovat osin häilyviä ja määritelmät paikoin päällekkäisiä. Kehitysmaiden osallistumisen laajentaminen ja kustannustehokkaiden päästöyksiköiden tarjontapotentiaalin kasvattaminen ovat poliittisesti hyväksyttävän ja ympäristötehokkaan sopimusjärjestelmän keskeisiä edellytyksiä.



Kuva 25. Nykymuotoinen CDM ja tulevaisuuden CDM:n mahdollisia elementtejä.

Laatikko 2. Tulevaisuuden CDM:n mahdollisia elementtejä.

Hankekohtainen CDM (*project-based CDM*)

Tavoitteena on päästöjä perusuran suhteen vähentävän hankkeen toteuttaminen ja hankkeen osittainen rahoittaminen muodostuneiden päästöyksiköiden myynnistä saatavilla tuloilla. Hankkeen **toteuttaja** on tyypillisesti yksityinen toimija tai kansalaisjärjestö, mutta julkinen tahokin voi toteuttaa hankkeita. Tyypillisesti kyseessä on yksittäinen, selkeästi yhtä hanketyyppiä edustava hanke. Hankkeen vaikutusalueen rajaus on suoraviivaista, ja hankkeen tuottamien päästövähennysten määrä ja ajankohta voidaan arvioida etukäteen varsin luotettavasti. **Esimerkki:** Vesivoimalaitoksen rakentaminen ja liittäminen sähköjakeluverkkoon.

CDM-hankepaketti (*CDM project bundling*)

Tavoitteena on usean hankkeen paketointi yhdeksi kokonaisuudeksi hankesyklin aiheuttamien transaktiokustannusten vähentämiseksi. Muilta osin paketin hankkeet vastaavat hankekohtaista CDM:ää; ne voisi toteuttaa yksittäisinäkin hankkeina. **Esimerkki:** Neljän vesivoimalan rakentaminen eri puolille maata.

Ohjelma-CDM (*programmatic CDM*)

Tavoitteena on päästöjen vähentämiseen tähtäävän ohjelman tai aloitteen toimeenpano ja sen aikaansaamien päästöyksiköiden myyminen kansainvälisillä päästömarkkinoilla. Ohjelman **toteuttaja** voi olla julkinen tai yksityinen taho ja kohteena voi olla esimerkiksi tietty sektori, tietty alue tai jonkin muu kohderyhmä. Ohjelma luo kannustimia päästövähennystoimille, joiden tarkkaa tyyppiä, sijaintia, ajankohtaa tai suuruutta ei välttämättä etukäteen, hankkeen hyväksymisvaiheessa, tiedetä. Ohjelman päästöjä vähentävä vaikutus on kyettävä osoittamaan ja vaikutuksen suuruuden on oltava jälkikäteen mitattavissa ja todennettavissa, jotta ohjelmalle voidaan myöntää osoitettua vaikutusta vastaava määrä päästöyksiköitä. Ohjelma on itsessään CDM-hanke, eivätkä sen seurauksena toteutuvat yksittäiset päästövähennystoimet voi itsessään olla CDM-hankkeita. **Esimerkki:** Halpakorkoinen laina uusiutuvalle energialle.

Sektori-CDM (*sectoral CDM*)

Tavoitteena on helpottaa yksityisten toimijoiden osallistumista CDM:ään valitulla sektorilla esimerkiksi kehittämällä sektorikohtaisia perusuria tai paketoimalla kokonaisen sektorin hankkeet yhteen. Hankkeiden **toteuttajana** ovat yksityiset tahot, jotka hyötyvät saamalla haltuunsa hanketoiminnan tuottamat päästöyksiköt ja niistä saatavat myyntitulot nykyistä vaivattomammin. Perusura kehitettäisiin todennäköisesti jonkin julkisen (tai muun) tahon toimeksiantona. Yksittäisille hankkeille ei tällöin tarvitsisi laatia erillisiä perusurailaskelmia, mikä vähentäisi osallistumiseen vaadittavia resursseja ja hankesyklin transaktiokustannuksia. Sektori-CDM saattaisi tuoda CDM:n piiriin sellaisia päästövähennystoimia, joissa pullonkaulana ovat olleet erityisesti perusuran määrittelyä koskevat ongelmat. Sektorin käsite on tässä joustava; sektori voi tarkoittaa myös tiettyä aluetta, tietyn teknologian käyttäjiä, tietyn kasvihuonekaasun päästölähteitä tai näiden yhdistelmiä. **Esimerkki:** Tietyn kaupungin liikennesektorin perusuran laskeminen.

Politiikka-CDM (*policy-based CDM*)

Tavoitteena on päästöjä vähentävien politiikkojen tai toimenpiteiden toimeenpano ja niiden aikaansaamien päästöyksiköiden myyminen kansainvälisillä päästömarkkinoilla. Poliitiikan **toteuttajana** on julkisen sektorin toimija. Poliitiikan kohteena voi ohjelma-CDM:n tapaan olla esimerkiksi yksi tai useampi sektori, jokin alue tai muu kohderyhmä. Poliitiikka-CDM:n piiriin kuuluisivat päästövähennyksiin tähtäävien julkisen sektorin ohjelmien lisäksi laajemmat politiikkakokonaisuudet, joissa päästöjen vähentäminen saattaa olla vain yksi monista tavoitteista, sekä lakisäateiset standardit. **Esimerkkejä:** maan sementtiteollisuuden modernisaatioon tähtäävät politiikkakokonaisuus, tietyn kaupungin liikenteen päästöjen vähentäminen ja valaistuksen tehostaminen.

Lähteet: *Cosbey et al. 2005, Figueres et al. 2005, Samaniego & Figueres 2002, Sterk & Wittneben 2005.*

4.3.2 Muut rahoitusratkaisut

SITRAn raportissa Cleantech-yritysten rahoitusmalleista (Linnainamaa & Teppo 2006) on esitetty yhteenveto rahoitusinstrumenteista Suomessa ja ulkomailla. Suurin osa kotimaisista rahoitusinstrumenteista kohdistuu innovaation elinkaarivaiheista kaupallistamisvaiheessa oleviin tuotteisiin tai yrityksiin. Rahoitusmuodot voivat olla pääomasijoituksia (Sitra, Vera, Finnfund, Suomen Teollisuussijoitus, yksityiset), lainoja ja takauksia (Finnvera) tai avustuksia (TE-keskukset, TEMin investointituet). Kansainvälisistä rahoitusinstrumenteista suurin osa selkeästi kohdistuu jo kaupallisiin tuotteisiin tai yrityksiin. Maailmanpankin alaisuudessa toimivat rahoitusorganisaatiot (esim. IFC, MIGA) edistävät suoria sijoituksia kehitysmaihin. Euroopan ja Pohjoismaiden rahoituslaitokset puolestaan pyrkivät edistämään alueensa integraatiota ja kehitystä. EuroopEuropean Bank for Reconstruction and Development (EBRD) ja Pohjoismaiden investointipankki (NIB) kanavoivat lisäksi rahoitusta kehitys- ja kehittyviin maihin suuntautuviin investointeihin. EU on ollut Aasian maiden energiaprojektien pääasiallinen rahoittaja 2000-luvulla, ja EU:lla on tarkoitus laajentaa edelleen energiarahoitustaan Acean Centre for Energy (ACE) -organisaation kautta.

Energiansäästöhankeisiin kohdistetussa ESCO-konseptissa perusajatuksena on, että investointi toteutettaisiin kokonaan ilman ”omaa rahaa” siten, että ESCO-palvelun tarjoava yritys ottaa kokonaisvastuun energiasäästöhankeeseen toteutuksesta ja usein myös rahoituksesta. ESCOn veloitus perustuu kokonaisuudessaan investoinnin tuottamaan energiakustannussäästöön.

5. Johtopäätökset ja jatkotyö

Tulevaisuuden ilmastopolitiikka tulee toimimaan energiateknologiamarkkinoita ajavana voimana. Toisaalta SETELI-projektin aikana vuoden 2012 jälkeinen ilmastopolitiikka oli vielä täysin avoin, joten esitetyt laskelmat ovat tekijöiden ”parhaita arvauksia” tulevaisuuden suuntauksista. Varmaa kuitenkin on, että vähäpäästöisillä ja energiatehokkailla teknologioilla tulee olemaan valtavat markkinat toisaalta ilmastonmuutoksen hillinnän vuoksi mutta myös kasvavien energian hintojen vuoksi. Nopeinta kehitys tulee olemaan kehitys- ja kehittyvissä maissa, joissa energian kulutuksen kasvu on nopeinta ja infrastruktuuri vielä kehitysasteella.

Taloudellisia energia-ympäristöanalyysseja tehdään pääasiassa kahta eri perustyyppiä edustavilla malleilla: ns. yleisen tasapainon malleilla ja osittaistasapainomalleilla. Eri tyyppiset mallit täydentävät toisiaan kuvaten talouden eri osia ja päästövähennyskeinoja. SETELI-hankeessa käytettiin kolmea globaalia, erityyppistä mallia: GTAP-, RICE- ja Global TIMES -mallia. Kyseisiä malleja käytettiin itsenäisesti sekä lisäksi muodostettiin GTAP-TIMES-mallisysteemi, jotta tulevaisuutta voitiin tarkastella mahdollisimman laajasti. GTAP-TIMES-mallisysteemi sallii päästövähennysten kustannustehokkaan kohdentamisen ajallisesti, alueellisesti, sektoraalisesti ja eri kasvihuonekaasujen välillä sekä sisältää uudet vähäpäästöiset teknologiat. Toisaalta mallilaskelmat ovat luonteeltaan pitkän aikavälin laskelmia eivätkä ota huomioon talouden sopeutumiskustannuksia. Lyhyen aikavälin vaikutukset voivatkin olla selvästi suuremmat. Lisäksi mallilaskelmissa ei otettu huomioon positiivisia vaikutuksia esim. uutta energiateknologiaa kehittäville toimialoille.

Ilmastonmuutoksen hillintä vaatii siirtymistä lähes nollapäästöiseen energijärjestelmään pitkällä aikavälillä, mikä aiheuttaa kustannuksia koko kansantaloudelle. Kokonaistalouden kustannukset jäivät tämän raportin laskelmissa kuitenkin vähäisiksi, kuten aiemmissakin tutkimuksissa on todettu. Vuonna 2050 arvioitu globaali BKT-tappio olisi vain prosentin luokkaa perusuraan verrattuna. Kokonaistalouden kustannukset olivat siten jonkin verran pienemmät kuin esim. Sternin raportissa mainitut. Toisaalta kansantalouden kustannuksissa esiintyi suuria alueellisia eroja sekä sektoraalisia eroja tarkasteltaessa esimerkiksi teollisuuden eri tuotantosektoreita. GTAP-laskelmien mukaan BKT aleni eniten entisen Neuvostoliiton alueella. Myös Intia ja Itä-Eurooppa olivat eniten kärsivien alueiden joukossa. Globaalit tuotannon muutokset jäivät melko pieniksi, mutta alueelliset tuotannon muutokset olivat selvästi suuremmat. Teollisuussektoreista tuotanto aleni eniten kemian teollisuudessa ja muiden metallien valmistuksessa, jossa alueelliset erot olivat huomattavat. Joillakin alueilla energiaintensiivisten tuotantosektorien tuotanto kasvoi niiden saadessa kilpailuetua. Alueelliset tuotantotulokset ovat hyvin herkkiä sähkön ja polttoaineiden hintasuhteille sekä mallin kustannusrakenteille ja joustojen arvoille.

Global TIMES -skenaarioiden perusteella globaali primäärienergiankulutus samoin kuin kasvihuonekaasupäästöt tulevat lähes kaksinkertaistumaan nykyisestä tasosta vuoteen 2050 mennessä. Suurinta kasvu on kehitysmaissa ja kehittyvissä maissa. Pelkästään energian kysynnän kasvun kattamiseen tarvittaisiin satoja ja mahdollisesti tuhansia miljardeja euroja investointirahaa. Samalla nykyinen energian tuotantokoneisto poistuu käytöstä ja myös energiainfrastruktuuri on ikääntymässä. Lähimpien vuosikymmenten aikana globaalisti ja alueellisesti tullaankin merkittävästi investoimaan sekä energian tuotantoon että energian siirtojärjestelmiin. Halvimpien energiaressurssien ehtyessä ja energian hinnan kohotessa tultaneen voimakkaasti investoimaan myös energiatehokkuuteen. Uuden energiajärjestelmän elinikä voi olla jopa viisikymmentä vuotta, joten lähi-vuosikymmenten päätökset tulevat vaikuttamaan yhden sukupolven ajan. Tarvittaisiin siis voimakasta kansainvälistä poliittisista päätöistä kasvihuonekaasujen hillitsemiseksi jo lähiaikoina, jotta päästöt saataisiin käännettyä laskuun nousun sijasta. Useissa selvi-tyksissä on osoitettu, että aikainen toiminta toisi merkittäviä kustannussäästöjä ja toi-saalta toimimatta jättämisen kustannusten ylärajaa on nykytietämyksellä mahdotonta arvioida.

Skenaariotarkasteluissa, joissa kasvihuonekaasupäästöjä rajoitettiin voimakkaasti, eten-kin globaali tuulivoiman ja bioenergian käyttö lisääntyi monikymmenkertaiseksi vuo-teen 2050 mennessä. Joillain alueilla tuulivoiman ja bioenergian käytöt lisääntyivät jopa monisatakertaiseksi vuoteen 2050 mennessä. Myös investoinnit CCS:n käyttöön vuoden 2020 jälkeen olivat merkittävät. Tuuli- ja bioenergian osalta energiaressurssien potentiaa-liarviot osoittautuivat merkittäväksi parametriksi. Bioenergian käyttö tulisi olla kestä-vällä pohjalla, mutta kestävä kriteeristön täyttävää potentiaalia on mahdoton määrittää globaalilla tasolla ja pitkällä aikavälillä. Ilmastonmuutos tulee myös vaikuttamaan sekä tuuliolosuhteisiin että bioenergian saatavuuteen. CCS:n osalta teknologia on edelleen voimakkaassa kehitysvaiheessa, mutta ongelmat liittyvät kuitenkin lähinnä CO₂:n pitkä-aikaisen (satoja vuosia) varastoinnin turvallisuuteen, hyväksyttävyyteen ja laillisiin es-teisiin. Globaalilla CO₂:n varastointipotentiaalia ei myöskään tunneta riittävän hyvin, vaan arviot ovat hyvin karkealla tasolla. Vaikka ydinvoimaan rahallisesti investoitiin vähemmän, ydinvoimakapasiteetti oli politiikkaskenaarioissa lähes kaksinkertainen. Vesivoimainvestoinnit kasvoivat huippuunsa myös ilman ilmastopolitiikkaa fossiilisten polttoaineiden hinnan kohotessa.

SETELI-hankkeen tulosten perusteella noin 60 prosenttia energiainvestoinneista suun-tautuisi kehitysmaihin. On ymmärrettävää, että rahoitus tulee olemaan kriittinen tekijä investointien toteuttamisessa. Nykymuotoinen, yksittäisiin hankkeisiin pohjautuva CDM pystyy realisoimaan vain murto-osan kehitysmaiden päästövähennyspotentiaalista eikä kykene luomaan riittäviä kannustimia kestävästä kehitystä laajemmin edistävälle ra-kenteellisille uudistuksille. Mekanismin kattavuutta voitaisiin laajentaa merkittävästi sallimalla päästöjä vähentävien kansallisten ja sektoritason ohjelmien ja politiikkojen

toteuttaminen CDM:n puitteissa. Kehitysmaiden osallistumisen laajentaminen ja kustannustehokkaiden päästöyksiköiden tarjontapotentiaalin kasvattaminen ovat poliittisesti hyväksyttävän ja ympäristötehokkaan sopimusjärjestelmän keskeisiä edellytyksiä.

SETELI-hankkeessa demonstroitiin globaalien kokonaistalous- ja energiajärjestelmämallien vahvuudet ja heikkoudet tarkasteltaessa mm. ilmastopolitiikan vaikutuksia investointeihin. Hankkeessa kyettiin myös hahmottamaan joitakin kriittisiä epävarmuustekijöitä arvioitaessa puhtaan teknologian kilpailukykyä ja kysyntää monimutkaisessa ympäristössä. Bioenergian riittävyys ja sen alueellinen jakautuminen on selkeästi yksi avaintekijä arvioitaessa bioenergiateknologioiden tulevaisuutta. Suurin epävarmuus bioenergian osalta liittyy peltokasvien hyödyntämiseen energiantuotannossa, koska mm. maankäyttöä ja lajien satoisuutta tulevaisuudessa ei tunneta. SETELIn jatkohankkeessa SEKKI tähän kysymykseen pureudutaan yhteistyössä Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen kanssa. SEKKI-hankkeessa tarkastellaan myös muiden, erityisesti fossiilisten, polttoaineiden riittävyttä. Suomen näkökulmasta katsottuna Venäjän kehitys ja erityisesti venäläisen maakaasun riittävyys on avaintekijä suomalaisen energiahuollon kannalta. Tähän kysymykseen pyritään saamaan uutta näkemystä yhteistyössä Suomen Pankin siirtymätalouksien tutkimuslaitoksen kanssa. Suomen teollisuuden kannalta kriittinen kilpailukykytekijä on lisäksi sähkön hinta. Myös tähän kysymykseen haetaan vastauksia arvioitaessa pohjoismaisten energiamarkkinoiden tulevaisuutta, sähkön kysyntää ja integroitumista Keski-Euroopan markkinoihin sekä arvioimalla Venäjän sähkömarkkinoiden kehitystä. Hankkeessa jatketaan ilmastopolitiikan vaikutusten arviointia Global TIMES -mallilla.

Lähdeluettelo

Ahonen, H.-M. 2006. Kioton pöytäkirjan joustomekanismien kehitysnäkymiä. Puhtaan kehityksen mekanismi, yhteistoteutus ja kansainvälinen päästökauppa vuoden 2012 jälkeisessä ilmastopolitiikassa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. (Verkkodokumentti) Versio 4, 27. toukokuuta 2006. (Viitattu 15.4.2008.) Saatavissa: <http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/ClimBus/fi/system/projekti.html?id=8838771&nav=Projekti>

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2045. 172 s. + liitt. 17 s. ISBN 951-38-5699-2; 951-38-5740-9. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

BP 2007. BP Statistical Review of World Energy June 2007. Lontoo: British Petroleum. (Viitattu 13.3.2008.) Saatavissa: <http://www.bp.com/statisticalreview>

Burniaux, J.-M & Truong, T. P. 2002. GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model. GTAP Technical Paper No. 16. Indiana: Purdue University. (Viitattu 3.3.2008.) 46 s. + liitt. 11 s.
Saatavissa: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/1203.pdf>

Cosbey, A., Parry, J. E., Browne, J., Babuy, Y. D., Bhandari, P., Drexhage, J. & Murphy, D. 2005. Realizing the Development Dividend: Making the CDM Work for Developing Countries. Phase I Report – Prepublication Version. International Institute for Sustainable Development (IISD), Winnipeg. 84 s.

Dimaranan, B. V. (ed.) 2006. Global Trade, Assistance, and Production: the GTAP 6 Data Base (Verkkodokumentti). Indiana: Center for Global Trade Analysis, Purdue University. (Viitattu 3.3.2008.) Saatavissa: https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v6/v6_doco.asp

Eurostat 2004. Eurostat Yearbook 2004. The statistical guide to Europe. Data 1992–2002. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 280 s. ISBN 92-894-4963-2

EWG 2007. Zittel, W. & Scindler, J. Crude Oil the Supply Outlook. Report to the Energy Watch Group. October 2007. Ottobrunn, Germany: Ludwig-Bölkov-Stiftung. EWG-Series No 3/2007. (Viitattu 4.3.2008.) 101 s. Saatavissa: http://www.energywatchgroup.org/fileadmin/global/pdf/EWG_Oilreport_10-2007.pdf

FAOSTAT 2003. Land use database. (Verkkodokumentti). Rome: Food and Agricultural Organisation of the United Nations. (Viitattu 10.10.2007.) Saatavissa: <http://faostat.fao.org/site/377/default.aspx>

Figueres, C., Econergy International Corp. & Margaree Consultants Inc. 2005. Study on Programmatic CDM project activities: Eligibility, Methodological Requirements and Implementation. Washington, D.C: World Bank Carbon Finance Unit. 56 s. Saatavissa: http://figueresonline.com/publications/Programmatic_CDM.pdf

Hassinen, A., Hietaniemi, L. & Lutfi, E. 2007. Ympäristöalan viennin rahoitus ja uudet liiketoimintamallit: Case-kohteina Baltian maat, venäjä ja Ukraina. Tutkimusraportti. (Verkkodokumentti.) 37 s. + liitt. 1 s. (Viitattu 10.3.2008.) ISBN 978-951-563-611-9. Saatavissa: <http://www.sitra.fi/julkaisut/muut/Ymparistoalanvienninrahoitusfinal.pdf>

Hertel, T. W. (ed.) 1997. Global Trade Analysis: Modeling and Applications. Cambridge, USA: Cambridge University Press. 397 s. ISBN 0-521-56134-5

Holttinen, H., Lemström, B., Meibom, P., Bindner, H., Orths, A., Van Hulle, F., Ensslin, C., Tiedemann, A., Hofmann, L., Winter, W., Tuohy, A., O'Malley, M., Smith, P., Pierik, J., Tande, J. O., Estanqueiro, A., Gomez, E., Söder, L., Strbac, G., Shakoor, A., Smith, J. C., Parsons, P., Milligan, M. & Wan, Y. 2007. Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power. State-of-the-art report. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Working Papers 82. 119 s. + liitt. 25 s. ISBN 978-951-38-6633-4. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2007/W82.pdf>

Hoogwijk, M. M. 2004. On the Global and regional Potential of Renewable Energy Sources. Proefschrift. (Viitattu 4.3.2008.) Utrecht, Holland: Utrecht University. 256 s. ISBN 90-393-3640-7. Saatavissa: <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2004-0309-123617/full.pdf>

IEA 2006. International Energy Agency. Energy Technology Perspectives. Scenarios and Strategies to 2050. Paris: OECD/IEA. 446 s. + liitt. 39 s. ISBN 92-64-10982-X

IEA WEO 2007. International Energy Agency. World Energy Outlook 2007. China and India Insights. Paris: OECD/IEA. 587 s. + liitt. 72 s. ISBN 978-92-64-02730-5

IPCC 2000. Nebojsa Nakicenovic (ed.) The Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report on Emissions Scenarios: Report of Working Group III. (Verkkodokumentti). Cambridge University Press. (Viitattu 10.3.2008.) Saatavissa: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>

IPCC 2001. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C. A. (eds). The Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group 1 to the third assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 785 s. + liitt. 96 s. ISBN 0521-80767-0. Saatavissa: http://www.grida.no/CLIMATE/IPCC_TAR/WG1/index.htm

IPCC 2007. Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. & Meyer, L. A. (eds). Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, Cambridge. (Verkkodokumentti). New York: Cambridge University Press. (Viitattu 10.3.2008.) Saatavissa: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>

JRC 2007. Russ, P., Wiesenthal, T., Regemorter, D. & Ciscar J. C. Global Climate Policy Scenarios for 2030 and beyond. Analysis of Greenhouse gas Emission Reduction Pathway Scenarios with the POLES and GEM-E3 models. Luxembourg: European Commission, Joint research Centre. 92 s. ISBN 978-92-79-07553-7

KOM 2007a. Euroopan Yhteisöjen komissio. Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentille, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Euroopan strategisen energiateknologiasuunnitelman laatiminen. Bryssel 10.1.2007. KOM (2006) 847 lopullinen. 14 s.

KOM 2007b. Euroopan Yhteisöjen komissio. Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentille, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Maailmanlaajuisen ilmastonmuutoksen rajoittaminen kahteen celsiusasteeseen. Toimet vuoteen 2020 ja sen jälkeen. Bryssel 10.1.2007. KOM (2007) 2 lopullinen. 13 s.

Labriet, M. & Loulou, R. 2005. Introduction to the Advanced World MARKAL Model and Description of the Inputs. Montreal, Kanada: Les Cahiers du GERAD. G-2005-01. (Viitattu 7.5.2007.) 16 s. + liitt. 61 s. ISSN 0711-2440. Saatavissa: <http://www.gerad.ca/fichiers/cahiers/G-2005-01.pdf>

Labriet, M., Loulou, R. & Kanudia, A. 2006. Is a 2 degrees Celsius warming achievable under high uncertainty? Analysis with the TIMES integrated assessment model. (Verkkodokumentti) International Energy Workshop. 27–29 June, 2006, Cape Town, South Africa. (Viitattu 10.1.2008.) Saatavissa: http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/IEW2006/IEW2006_program.pdf

Laine, A. 2008. Kioton pöytäkirjan alaisten CDM- ja JI-hankkeiden kehitys vuonna 2007 suomalaisen energiateknologian kysynnän näkökulmasta. Helsinki: Suomen

ympäristökeskus, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 18/2008. 23 s. + liitt. 1 s. ISBN 987-952-11-3130-1. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=85013&lan=fi>

Linnainmaa, T. & Teppo, T. 2006. Cleantech-yritysten rahoitusmallit. Cleantech Invest Oy. Helsinki: SITRA. (Viitattu 1.3.2008.) 43 s. ISBN 951-563-535-7. Saatavissa: <http://www.sitra.fi/julkaisut/muut/ympubstrategia1.pdf>

Liski, M. 2008. Sternin raportti ja sen kritiikki. Kansantaloudellinen aikakauskirja 1/2008. 104. vuosikerta. Helsinki: Palkansaajien tutkimuslaitos. (Viitattu 15.5.2008.) S. 57–71. Saatavissa: <http://www.hse.fi/NR/rdonlyres/17BDBB7A-E039-4DCE-95DB-503A21CB6D39/0/YMSternFinal.pdf>

Loikala, J., Hulkkonen, S., Itkylä, S., Kaushik, A., Keränen, S., Nisula, R., Roiha, U., Saren, H., Alam, J., Kuusela, P., Phan, T., Rautanen, T., Saijonmaa, M. & Strand, S. 2006. Opportunities for Finnish Environmental Technology in India. Helsinki: Edita Prima Oy, Sitra Reports 63. (Viitattu 1.3.2008.) 172 s. ISBN 951-563-520-9. Saatavissa: <http://www.sitra.fi/julkaisut/raportti63.pdf>

Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtilä, A. & Goldstein, G. 2005. Documentation for the TIMES Model. (Verkkodokumentti) Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), April 2005. (Viitattu 10.1.2008.) Saatavissa: <http://www.etsap.org/documentation.asp>

Mroueh, U.-M., Ajanko-Laurikko, S., Arnold, M., Laiho, A., Wihersaari, M., Savolainen, I., Dahlbo, H. & Korhonen, M. R. 2007. Uusien jätteenkäsittelykonseptien mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2402. 170 s. + liitt. 5 s. ISBN 978-951-38-6959-5; 978-951-38-6960-1. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2402.pdf>

Nordhaus W. 2007. A Review of The Stern Review of the Economics of Climate Change. Journal of Economic Literature Vol. 45, No. 3. Saatavissa http://nordhaus.econ.yale.edu/stern_050307.pdf

Nordhaus, W. D. & Boyer, J. 1999. Warming the World: Economic Models of Global Warming. Cambridge: MIT Press. 212 s. ISBN 10:0-262-64054-6. Saatavissa: <http://www.econ.yale.edu/%7Enordhaus/homepage/web%20table%20of%20contents%20102599.htm>

Pohjola, J. 2008. Regional and sectoral impacts of GHG emission reductions under 2 C limit: Results from GTAP-Global TIMES model system. Julkaistaan sarjassa Helsinki School of Economics Working Papers.

Ronde, H. 2008. Clean Energy Opportunities in ASEAN countries. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Research Report no VTT-R-03523-08. 15.4.2008. 30 s. + liitt. 11 s.

Samaniego, J. & Figueres, C. 2002. Evolving to a Sector-Based Clean Development Mechanism. Teoksessa: Baumert, K. A. (toim.). Building on the Kyoto Protocol: Options for Protecting the Climate. Washington, D.C: World Resources Institute (WRI). S. 89–108. ISBN 1-56973-524-7

Sterk, W. & Wittneben, B. 2005. Addressing Opportunities and Challenges of a Sectoral Approach to the Clean Development Mechanism. JIKO Policy Paper 1/2005. Wuppertal, Germany: Wuppertal Institute. 15 s. Saatavissa:
http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/addressing-opportunities.pdf

Stern, N. 2007. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge, UK: Cambridge University Press. (Viitattu 10.11.2007.) ISBN 978-0-521-70080-1. Saatavissa:
http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm

Teppo, T. & Linnainmaa, T. 2006. Cleantech – rahoitusmarkkinat. (Verkkodokumentti) 47 s. Helsinki: Sitra. ISBN 951-563-574-0. (Viitattu 1.3.2008.) Saatavissa:
http://www.sitra.fi/julkaisut/muut/cleantech_rahoytusmarkkinat.pdf

United Nations 2005. World Population Prospects. The 2004 Revision. (Verkkodokumentti.). (Viitattu 10.3.2008.) Saatavissa:
http://www.un.org/esa/population/publications/WPP2004/WPP2004_Volume3.htm

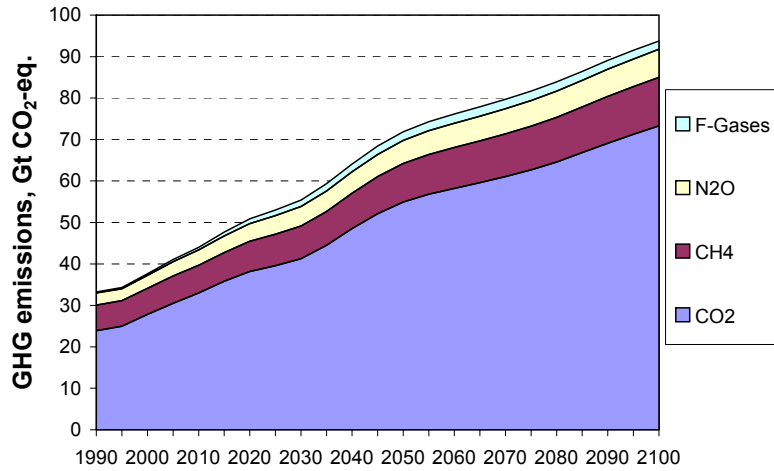
USGS 2000. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment 2000 Description and Results. (Verkkodokumentti) (Viitattu 10.3.2008.) Saatavissa: <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-060/>

Vanhanen, J., Halonen, M., Hiltunen, J., Loikala, J., Hulkkonen, S. & Hietaniemi, J. 2006. Suomen ilmastoklusterin kilpailuetu. Teknologiakatsaus 194/2006. Espoo: Tekes. 82 s. (Viitattu 10.3.2008.) ISSN 1239-758X. Saatavissa: <http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/ClimBus/fi/etusivu.html>

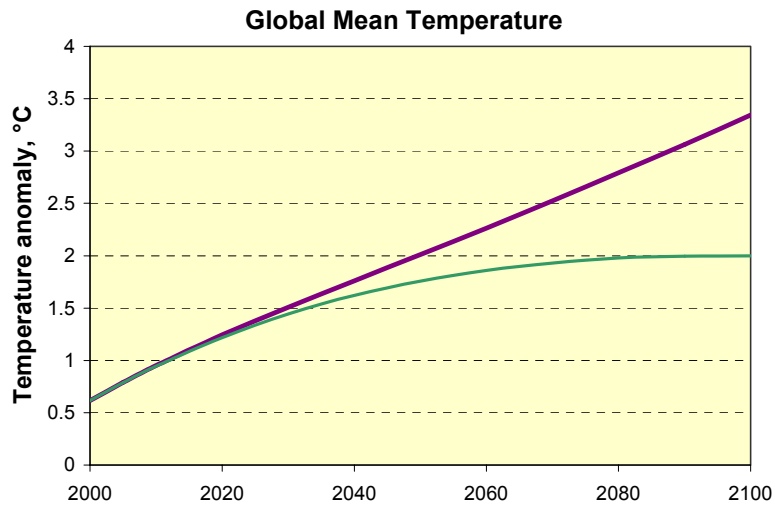
WEC 2004. World Energy Council. Survey of energy resources. 20th edition. The Netherlands: Elsevier. 446 s. ISBN 0-08-044410-5.

Liite A: Global Times -skenaariotuloksia

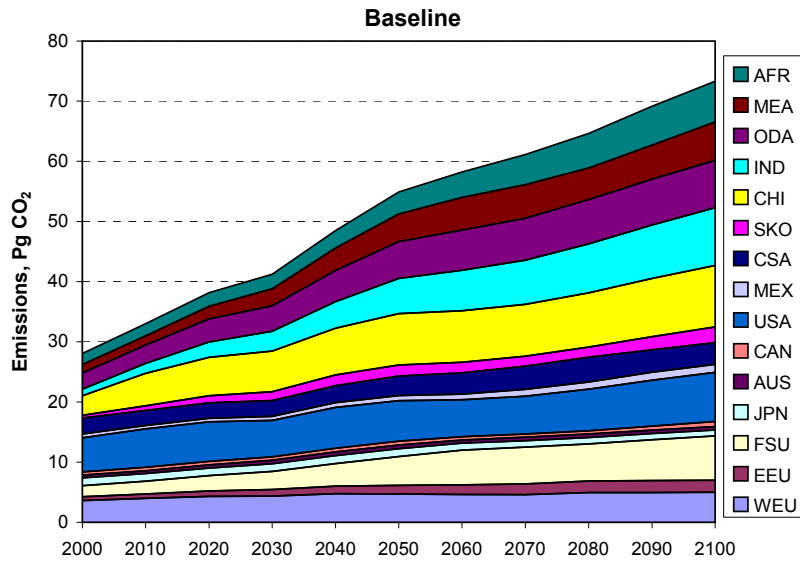
Greenhouse gas emissions: Baseline



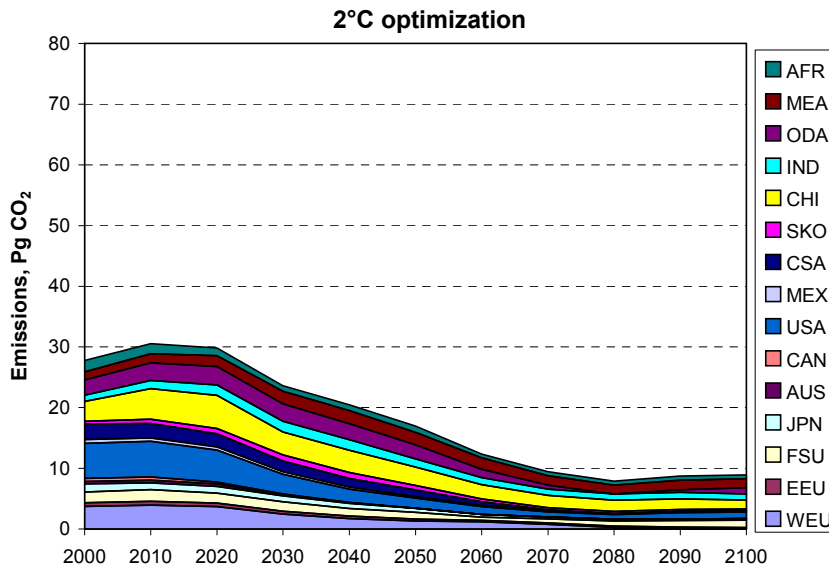
Increase in global temperature: Baseline



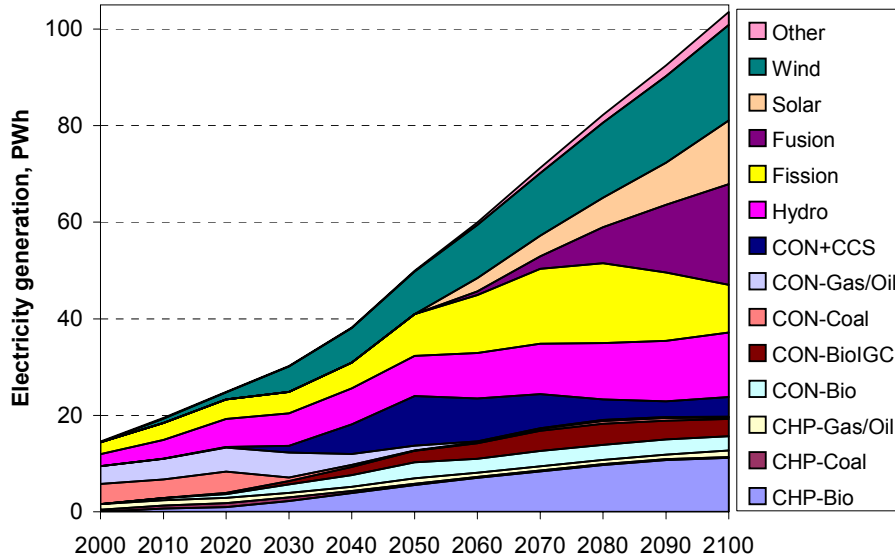
CO2 emissions by region: Baseline



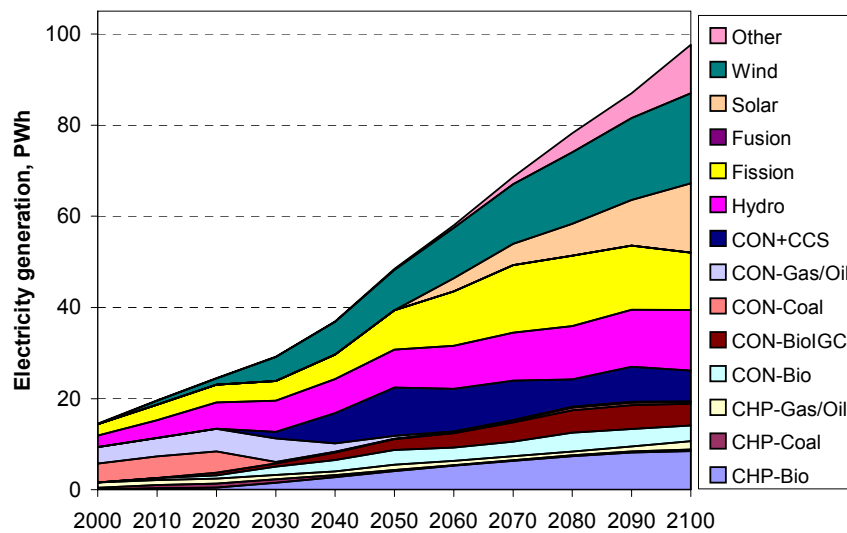
CO2 emissions by region: 2°C limit – global trading



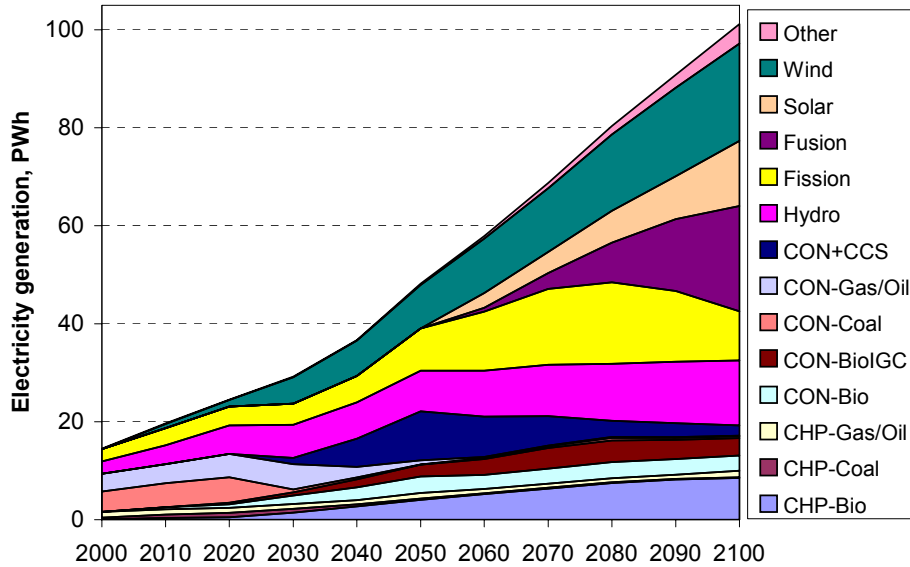
Global electricity supply: 2°C target, CDM



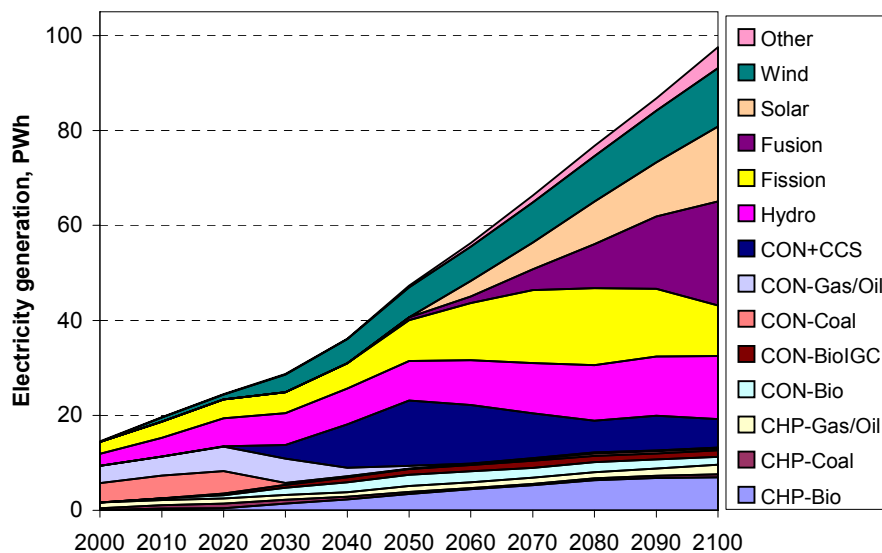
Global electricity supply: 2°C target, global trade, no fusion



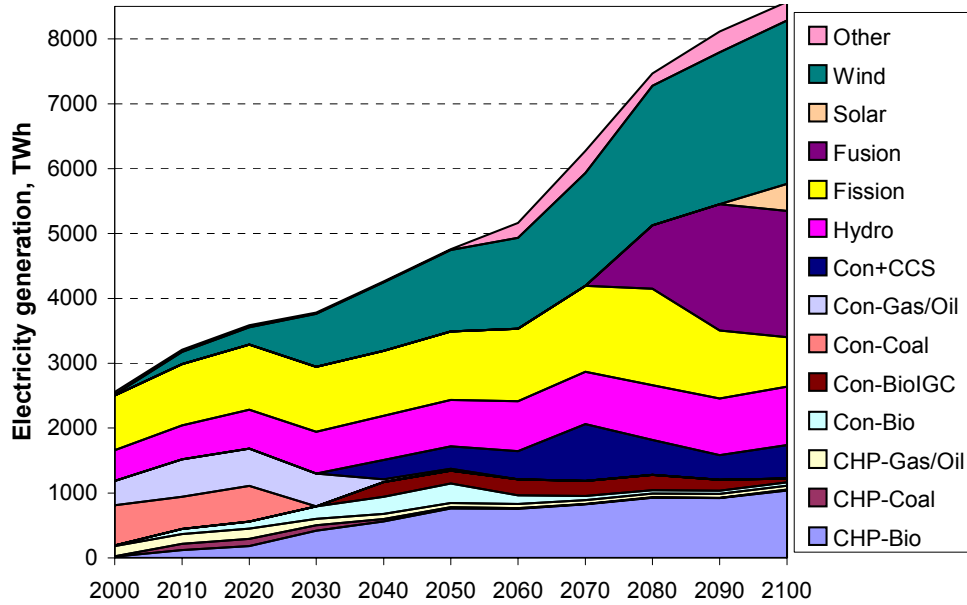
Global electricity supply: 2°C target, global trade, low CCS



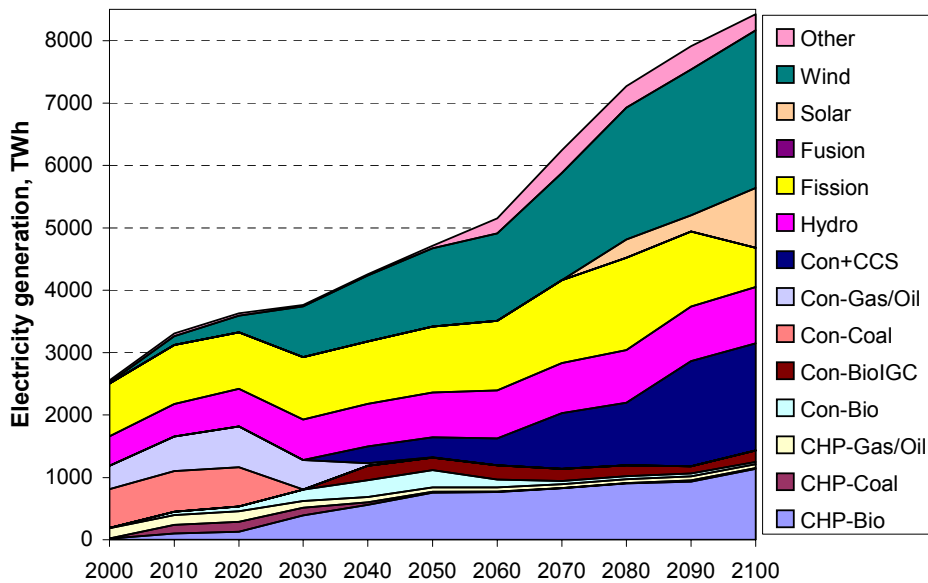
Global electricity supply: 2°C target, global trade, low renewb.



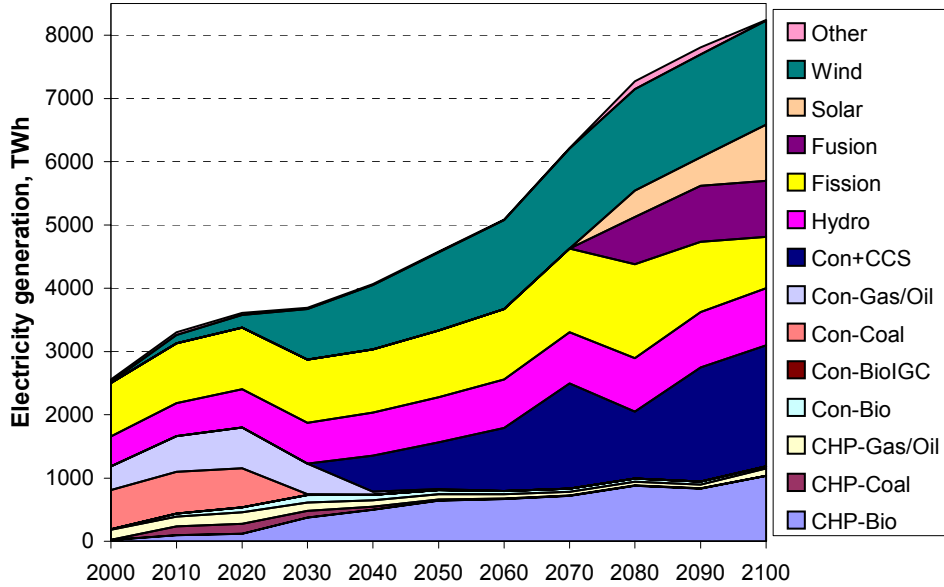
WEU electricity supply: 2°C target, CDM



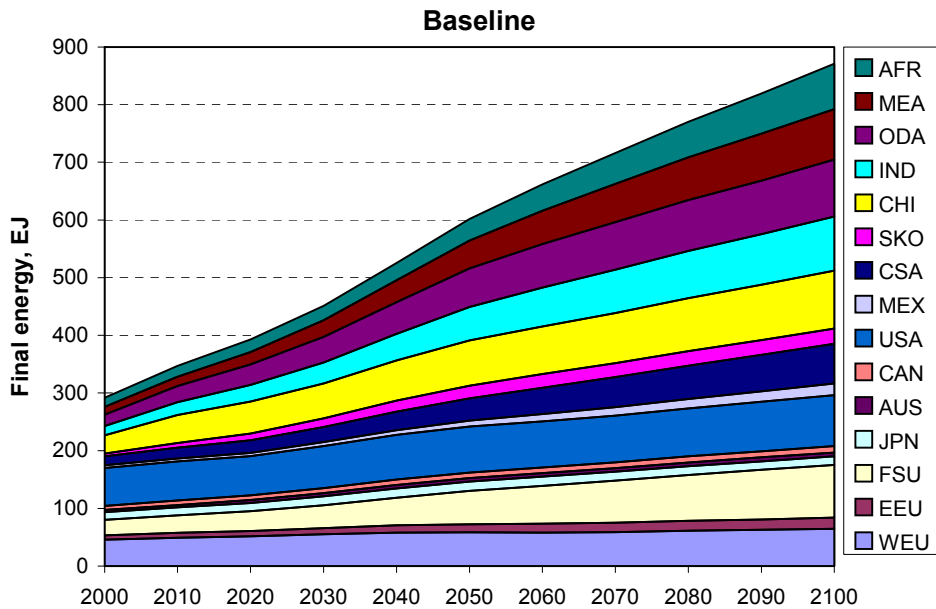
WEU electricity supply: 2°C target, global trade, no fusion



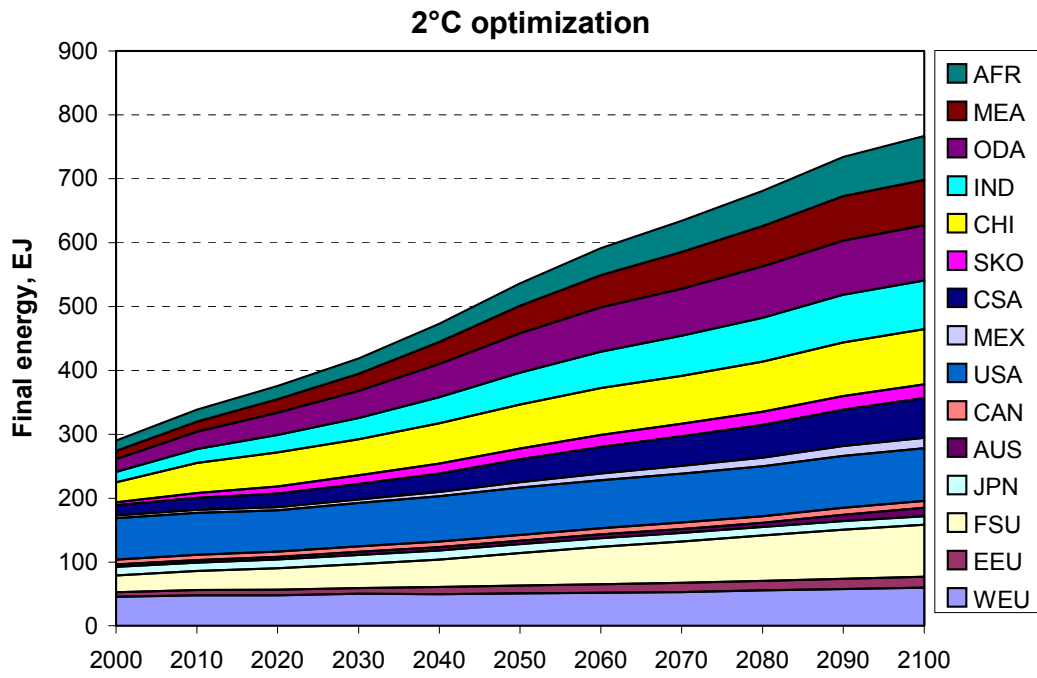
WEU electricity supply: 2°C target, global trade, low renewb.



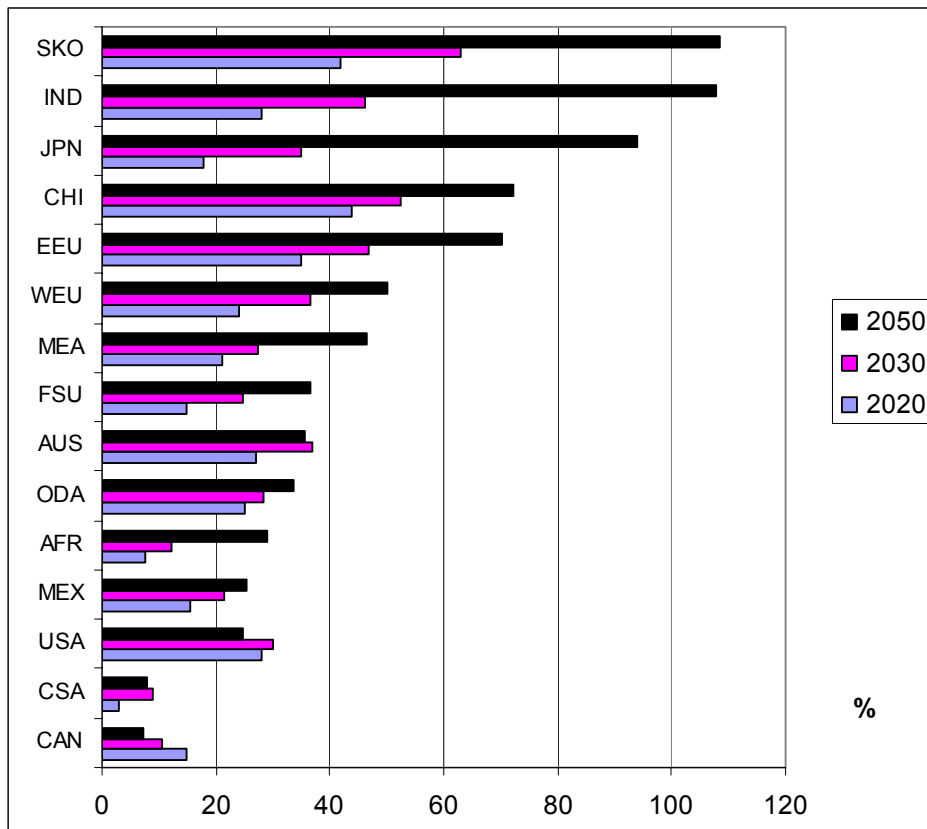
Global Final Energy



Global Final Energy



Liite B: GTAP-mallilaskelmissa käytetyt Global TIMES -mallin tuottamat sähkön hintamuutokset vuosina 2020, 2030 ja 2050



<p>Tekijä(t) Koljonen, Tiina, Pohjola, Johanna, Lehtilä, Antti, Savolainen, Ilkka, Flyktman, Martti, Peltola, Esa, Haavio, Markus, Liski, Matti, Haaparanta, Pertti, Ahonen, Hanna-Mari, Laine, Anna & Estlander, Alec</p>		
<p>Nimeke Suomalaisen energiateknologian globaali kysyntä ilmastopoliitiikan muuttuessa</p>		
<p>Tiivistelmä Tulevaisuuden ilmastopoliittikka tulee toimimaan energiateknologiamarkkinoita ajavana voimana. Toisaalta ilmastonmuutoksen hillintä aiheuttaa kustannuksia koko kansantaloudelle. Tutkimuksessa arvioitiin skenaariotarkasteluin suomalaisen puhtaan energiateknologian kysyntää globaalisti sekä eri maantieteellisillä alueilla ilmastopoliitiikan muuttuessa. Mallinnuksessa käytettiin globaaleja kokonaistalousmalleja GTAP ja RICE sekä Global TIMES -energiajärjestelmämallia. Työssä tarkasteltiin myös tulevaisuuden puhtaan teknologian vientiä edistäviä rahoitusmekanismeja keskittyen tulevaisuuden JI- ja CDM-mekanismeihin. Skenaariotarkasteluissa ilmastopoliittiseksi tavoitteeksi valittiin EU:n esittämä kahden asteen tavoite. Kokonaistalouden kustannukset jäivät tämän tutkimuksen laskelmissa vähäisiksi, kuten aiemmissakin tutkimuksissa on todettu. Vuonna 2050 arvioitu BKT-tappio olisi vain prosentin luokkaa perusuraan verrattuna. Global TIMES -skenaarioiden perusteella globaali primäärienergiankulutus samoin kuin kasvihuonekaasupäästöt tulisivat lähes kaksinkertaistumaan nykyisestä tasosta vuoteen 2050 mennessä ilman ilmastopoliittikkaa. Noin 60 prosenttia energiainvestoinneista suuntautuisi kehitysmaihin, joissa pelkäästään energian kysynnän kasvun kattamiseen tarvittaisiin satoja tai mahdollisesti tuhansia miljardeja euroja investointirahaa. Nykymuotoinen, yksittäisiin hankkeisiin pohjautuva CDM pystyy realisoimaan vain murto-osan kehitysmaiden päästövähennyspotentiaalista, joten mekanismin kattavuutta tulisi laajentaa merkittävästi. Poliittikkaskenaarioissa suurin osa investoinneista kohdistui bioenergiateknologisiin sekä tuulivoimaan. Vuoden 2020 jälkeen myös investoinnit hiilidioksidin erotukseen ja varastointiin kasvoivat merkittäviksi.</p>		
<p>ISBN 978-951-38-7236-6 (nid.) 978-951-38-7237-3 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		
<p>Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		<p>Projektinumero 379-37SETELI</p>
<p>Julkaisu-aika Syyskuu 2008</p>	<p>Kieli Suomi, engl- tiiv.</p>	<p>Sivu-ja 63 s. + liitt. 8 s.</p>
<p>Projektin nimi SETELI (Suomalaisen energiateknologian kysyntä ja kansainväliset liiketoimintamahdollisuudet ilmastopoliitiikan muuttuessa)</p>		<p>Toimeksiantaja(t) Tekes, Climbus-ohjelma</p>
<p>Avainsanat climate policy, energy technology markets, future, modelling, financing, investments, global economy, regional economy, clean energy technologies, scenarios, energy systems, energy services</p>		<p>Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374</p>

<p>Author(s) Koljonen, Tiina, Pohjola, Johanna, Lehtilä, Antti, Savolainen, Ilkka, Flyktman, Martti, Peltola, Esa, Haavio, Markus, Liski, Matti, Haaparanta, Pertti, Ahonen, Hanna-Mari, Laine, Anna & Estlander, Alec</p>		
<p>Title Global demand of Finnish clean energy technologies under developing climate policies</p>		
<p>Abstract The future climate policies will be the main driver in future energy technology markets. On the other hand, tackling climate change would cause costs for the national economies. In this report the demand of Finnish clean energy technologies were evaluated with scenario analys. The models used were global economy models GTAP and RICE and the Global TIMES energy system model. Also future financing mechanisms promoting investments in clean energy technologies, like JI- and CDM-mechanisms, were investigated. The starting point of the scenario analysis was the EU's 2 degree C target. The macroeconomic costs of climate policies were low in our calculations, which is in line with other studies. In 2050 the GDP loss would account to less than 1% compared to the Baseline scenario. According to the Global TIMES scenarios, the global primary energy use likewise emissions would nearby double without climate policies. Approximately 60% of energy investments would go to the developing countries, where the investments need to cover the increasing energy demand alone would require hundreds of millions or even billions of euros of investment money. The existing project based CDM is able to realize a minor part of the emission reduction potential in the developing countries. The scope of the future CDM should therefore be extended remarkably. In the policy scenarios, most of the investments were based on bioenergy technologies and wind power. After 2020 the investments in CO₂ capture and storage increased also substantially in our calculations.</p>		
<p>ISBN 978-951-38-7236-6 (soft back ed.) 978-951-38-7237-3 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		
<p>Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		<p>Project number 379-37SETELI</p>
<p>Date September 2008</p>	<p>Language Finnish, Engl. abstr.</p>	<p>Pages 63 p. + app. 8 p.</p>
<p>Name of project SETELI</p>		<p>Commissioned by Tekes, Climbus Programme</p>
<p>Keywords climate policy, energy technology markets, future, modeling, financing, investments, global economy, regional economy, clean energy technologies, scenarios, energy systems, energy services</p>		<p>Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374</p>

Tulevaisuuden ilmastopoliittikka tulee toimimaan energiateknologiamarkkinoita ajavana voimana. Toisaalta ilmastomuutoksen hillintä aiheuttaa kustannuksia koko kansantaloudelle. Tutkimuksessa arvioitiin skenaariotarkasteluin suomalaisen puhtaan energiateknologian kysyntää globaalisti sekä eri maantieteellisillä alueilla ilmastopoliittikan muuttuessa. Mallinnuksessa käytettiin globaaleja kokonaistalousmalleja GTAP ja RICE sekä Global TIMES -energiajärjestelmämallia. Työssä tarkasteltiin myös tulevaisuuden puhtaan teknologian vientiä edistäviä rahoitusmekanismeja keskittyen tulevaisuuden JI- ja CDM-mekanismeihin.

Julkaisu on saatavana

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

Publikationen distribueras av

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

This publication is available from

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