

Skenaarioita maailman kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisesta

■ Lassi Similä ja Ilkka Savolainen

Ilmaston muuttumisen hillintä on valtava haaste. Kööpenhaminan sitoumuksessa pyritään rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen. Maailman kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen kahden asteen tavoitteen mukaisesti merkitsee Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (VTT) laadittujen skenaariolaskelmien mukaan mullistusta maailman energian tuotannossa ja kulutuksessa. Investoinnit pelkästään sähkötuotantoon tulevat olemaan yli tuhat miljardia euroa vuodessa vuosisatamme puolivälissä. Vaadittava kehitys luo myös valtavat markkinat teknologian kehittäjille ja valmistajille sekä voi olla myös hyvin merkittävä elinkeino ja vaurauden lähde, esimerkiksi Suomessa.

Ilmaston muuttuminen ihmisen toiminnan seurauksena tulee olemaan suuri muutos luonnolle ja myös ihmiselle. Arvioidaan, että maapallon vähittäinen lämpeneminen ja sateisuuden muutokset tulevat tämän vuosisadan kuluessa olemaan hyvin tärkeä luontoa ja ihmisen elinolosuhteita muuttava tekijä. Yksi suurimmista vaikutuksista ihmiskuntaan tulee ilmenemään sateiden ja maaperän kosteuden muutoksina, jotta vaikeuttavat veden saantia ja ravinnon tuotantoa kuivuvilla alueilla, erityisesti monissa kehitysmaissa, joissa yhteiskunnan sopeutumiskyky on heikko.

Haitallisia vaikutuksia pyritään pienentämään kahdella tavalla. Ensiksikin ilmaston muuttumista pyritään hillitsemään vähentämällä kasvihuonekaasujen päästöjä. Koska ilmaston muuttumista ei pystytä kokonaan estämään kovillakaan toimilla, on välttämätöntä myös sopeutua muuttuvaan ilmastoon haittojen pienentämiseksi.

Ilmaston muuttumisen hillintä on valtava haaste. Maapallon väkiluku nousee ja talous

sekä kulutusodotukset kasvavat vielä nopeammin. Seurauksena ovat lisääntyvä energian käyttö ja yhä kasvavat kasvihuonekaasujen päästöt fossiilisista polttoaineista. Euroopan unioni on esittänyt, että maapallon keskilämpötilan nousu tulisi rajoittaa kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna, jotta ilmaston muuttumisesta aiheutuvat haitat pysyisivät siedettävällä tasolla. Tämä tavoite on kirjattu myös Kööpenhaminan ilmastoneuvotteluissa saavutettuun sitoumukseseen (*Copenhagen Accord*).

Maailman kasvihuonekaasujen päästöt ovat kasvussa

Merkittävin ihmisen toiminnan vapauttama kasvihuonekaasu on hiilidioksidi (CO_2). Hiilidioksidipäästöjä aiheutuu erityisesti fossiilisten polttoaineiden käytöstä mutta myös ekosysteemeistä niiden sisältämän hiilivaraston pienessä. Esimerkiksi trooppisten metsien hävitys on tällainen maakekosysteemien hiilivarastoa pienentävä tekijä. Metaanin (CH_4) päästöjä aiheutuu mm. polttoaineiden tuotannosta, karjataloudesta ja riisin viljelystä. Kolmas tärkeä kasvihuonekaasu, jonka päästöjä ihminen aiheuttaa, on dityppioksidi (N_2O). Sen päästöjä aiheutuu mm. polttoprosesseista ja maaperästä lannoitteiden käytön seurauksena. Lisäksi ihminen aiheuttaa mm. halogenoitujen hiilivetyjen päästöjä. Kuvassa 1 esitetään arvio ihmisen toiminnasta aiheutuvien maailman kasvihuonekaasujen päästöjen jakautumisesta sektoreittain vuonna 2005.

Maailman kasvihuonekaasujen päästöt ovat voimakkaassa kasvussa. Maailman hiilidioksidipäästöt energiantuotannosta kasvoivat 2000-luvun alkuvuosina keskimäärin kolme prosenttia vuodessa. Nykyinen taloudellinen taantuma on kuitenkin aiheuttanut päästöihin

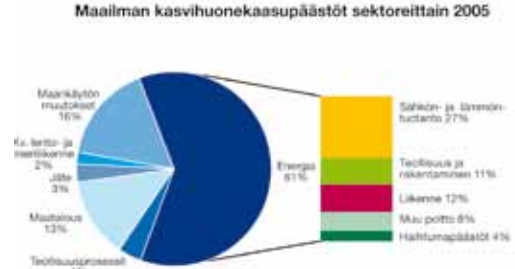
tilapäisen laskun, mutta kun taantuma on ohi, päästöt kasvanevat taas voimakkaasti, ellei niitä onnistuta hillitsemään. Kuvassa 2 on arvio maailman energiaperäisten päästöjen kasvusta ilman rajoitustoimia (ns. perusura). Kuvassa on myös esitetty arvio vaadittavasta päästövähennyksen suuruusluokasta, kun lämpötilan nousu pyritään rajoittamaan kahteen asteeseen.

Energiajärjestelmän muita haasteita

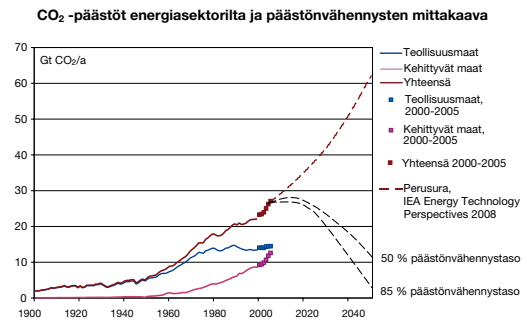
Energiajärjestelmään kohdistuu myös muita haasteita kuin ilmastonmuutoksen hillintä ja muiden ympäristöhaittojen rajoittaminen (mm. polttoprosessissa syntyvien pienhiukkasten aiheuttavat terveyshaitat). Tärkeimmistä maailmassa nykyisin käytetyistä energiavaroista erityisesti öljy- ja kaasuvarat ovat maantieteellisesti erittäin keskittyneitä. Lukuisissa tutkimuksissa helposti hyödynnettävien öljy- ja kaasuvarojen arvioidaan saavuttavan tuotantohuippunsa tulevien vuosikymmenten aikana. Useat maat ovat erittäin riippuvaisia tuontienergiasta. Kehityssuuntaus voi tulevaisuudessa vaarantaa yhä useamman maan energian saatavuuden ja altistaa ne yhä haavoittuvammiksi energian hinnan muutoksille. Viimeisten vuosikymmenten kehityssuuntaus on johtanut siihen, että maiden tai maaryhmien *energiaturvallisuuden parantaminen* on yksi keskeinen tulevaisuuden kehitystä ajava voima.

Kehittyneitä teollisuusmaita ja kehittyviä maita tulevaisuudessa kohtaavat energiaan liittyvät haasteet ovat hyvin erilaisia. Kehittyvissä maissa on yhä 1,5 miljardia ihmistä ilman nykyaikaisia energiapalveluita, mikä on vakava este kehitykselle. Kehittyneissä maissa ongelmat liittyvät ikääntyvien energiajärjestelmien suuren kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Ympäristöystävällisiä ratkaisuja tarvitaan myös kehittyvissä maissa, joissa energiantarve kasvaa nopeasti.

Energiantuotannon ja käytön järjestelmän on muututtava perustavanlaatuisesti, jotta tulevaisuuden haasteisiin voidaan vastata. Keinot kehitykseen vaikuttamiseksi voidaan periaatteessa jakaa kahteen luokkaan 1) teknologiset keinot ja 2) kulutuksen rakenteen muuttumiseen vaikut-



Kuva 1. Ihmisen toiminnasta aiheutuvat kasvihuonekaasujen päästöt maailmassa lähteittäin vuonna 2005. Ihmisen toiminnasta aiheutuvien päästöjen kokonaismäärä on luokkaa 46 miljardia tonnia hiilidioksidiekvivalentteina. Energia-sektori aiheuttaa suurimman osan päästöistä. Maatalous on myös merkittävä päästöjen lähde, samoin maankäytön muutokset mukaan lukien trooppisten metsien häviytyminen. Erittäin maankäytön muutosten ja maatalouden päästöarvioiden epävarmuus on suuri.



Kuva 2. CO₂-päästöt fossiilisten polttoaineiden käytöstä teollisuusmaissa (ns. Kioton pöytäkirjan liitteen I valtiot) ja kehittyvissä maissa (muut kuin Kioton pöytäkirjan liitteen I valtiot). Kuvassa näkyy toteutuneiden päästöjen historia vuosina 1900–2005 ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaadittavien päästövähennysten mittakaava. IPCC:n (2007) mukaan tarvitaan 50–85 %:n vähennys vuoden 2000 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jotta maapallon keskilämpötilan nousu esiteolliseen aikaan verrattuna voidaan rajoittaa kahteen asteeseen. Rajoittamalla maapallon keskilämpötilan nousu esiteolliseen aikaan verrattuna voidaan rajoittaa kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden voidaan merkittävästi rajoittaa ilmaston muuttumisesta seuraavia haittoja verrattuna tilanteeseen, jossa lämpötila nousisi selvästi yli kahden asteen tason. (Kuva: VTT 2009.)

tavat keinot. Teknologian ja kulutuksen muutokseen liittyvät keinot eivät kuitenkaan välttämättä ole toisistaan riippumattomia.

Tehokkaampia energian tuotanto- ja loppukäyttöteknologioita on syytä tulevaisuudessa kehittää ja ottaa käyttöön. Energiantuotannon tulee tulevaisuudessa perustua hiilidioksidipääs-

töttömiin ja vähäpäästöisiin tuotantomuotoihin, joihin kuuluvat uusiutuvia energialähteitä hyödyntävät teknologiat, ydinvoima sekä hiilidioksidin erotus- ja varastointiteknologiat (*carbon capture and storage, CCS*). Uusien energiatekniologioiden soveltaminen aiheuttaa tulevaisuudessa kehitystarpeita myös energian jakelulle, kuten sähkönsiirto- ja jakeluverkoille.

Teknologian kehitys on varsin hidasta. Teknologian kehittyminen laboratorioista laajasti markkinoille voi kestää vuosikymmeniä. Lisäksi erityisesti energiajärjestelmässä tyypillisesti muutoksia hidastavat *investointien pitkät käyttöiät*. Esimerkiksi rakennusten tekniset käyttäjät ovat tyypillisesti 50–100 vuotta, samoin vesi- ja ydinvoimalaitosten eliniät voivat ylittää 50 vuotta. Toisaalta hitaudesta johtuen vuoteen 2050 asti ulottuva perspektiivi on mahdollinen energiajärjestelmän muutoksia ja kehitysmahdollisuuksia tarkasteltaessa.

Talouden ja energiajärjestelmän kuvaaminen

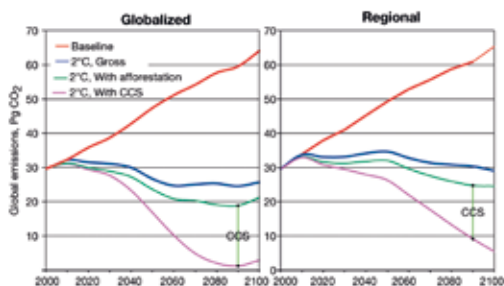
VTT:n *Energy Visions 2050* -kirjassa on rakennettu erilaisia skenaarioita energiajärjestelmän pitkän aikavälin tulevaisuudesta ja kasvihuonekaasupäästöjen kehityksestä vuoteen 2050 asti ja pidemmällekin. Skenaariot on saatu laajoista mallilaskelmista, joissa on oletettu erilaisia maailmantalouden, informaatio- ja pääomavirtojen ja teknologian kehityksen kehityskulkuja. (Lehtilä ym. 2009.)

Skenaariot eivät ole ennusteita tulevasta. Ne tulee nähdä sisäisesti ristiriidattomina ”entä jos”-tulevaisuudenkuvina. Tuloksista saadaan mm. arvioita päästörajoitustavoitteiden saavuttamisesta ja aiheutuvista kustannuksista sekä vastaavista tulevaisuuden energiajärjestelmien rakenteesta.

Energiajärjestelmäskenaariot on laadittu VTT:n koko maailman kattavalla TIAM-mallilla (*TIMES Integrated Assessment Model*). Monipuolisten teknologiakuvausten lisäksi malli sisältää periaatteessa kaikki ihmisperäiset kasvihuonekaasupäästöjen lähteet sekä yksinkertaistetun ilmastomallin.

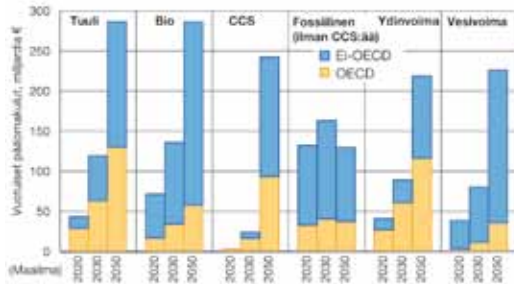
Valtion taloudellinen tutkimuskeskus VATT laati Global Trade Analysis (GTAP) -projektin

Global CO₂ emissions in the Baseline and 2°C mitigation scenarios



Kuva 3. Hiilidioksidipäästöt globalisoitumiskehitystä vastaavassa kahden asteen skenaariossa (vasemmanpuoleinen kuva) ja alueellinen maailma -skenaariossa (oikeanpuoleinen kuva) pyrittäessä hillitsemään maapallon lämpötilan nousua. Globalisaatioskenaariot alin käyrä vastaa tasoa, jolla saavutetaan lämpötilan nousu rajoittumisen kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. Alueellinen maailma -skenaariossa lämpötila nousee mallitulosten mukaan yli kaksi astetta. Punaisen ja sinisen käyrän väli vastaa pääosin energiajärjestelmässä tehtyjen muutosten ja tehostamisen osuutta päästövähennyksissä. Sinisen ja vihreän väli vastaa hiilen varastointia biosfääriin metsänieluun, vihreän ja sinipunaisen väli hiilidioksidin erotusta ja varastointia (CCS). (Lehtilä ym. 2009.)

Vuotuiset pääomakulut uuteen sähkön- ja lämmöntuotantokapasiteettiin maailmassa 2020–2050, 2°C Markkina -skenaario



Kuva 4. Vuotuiset pääomakulut uuteen sähkön- ja lämmöntuotantokapasiteettiin maailmassa vuosina 2020–50 skenaariossa, jossa maapallon lämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen.

tietokannoilla ja malleilla simulointilaskelmia maailmantalouden pitkän aikavälin kehityksestä. Tuloksia talouden eri sektorien tuotantovolyymien kehityksistä maailmantaloudessa ja alueellisissa talouksissa käytettiin TIAM-mallin lähtötietoina energiaskenaarioiden tuottamiseksi. VATT rakensi energiajärjestelmäskenaarioita varten kaksi erilaista talousskenaariota: perusuran, jossa globalisaatioketjy jatkuu nykyisen

kaltaisena, ja alueellisen maailma -skenaarion, jossa protektionistiset ja nationalistiset piirteet kaupapolitiikoissa voimistuvat.

Perusura-skenaario kuvaa kehityksen jatkumista nykyisen kaltaisena. Siinä voimassa olevat politiikat vastaavat tilannetta ennen vuotta 2005, jolloin Kioton pöytäkirja tuli voimaan. Perusura-skenaariossa ei oleteta kansainvälisiä ilmastopimuksia.

Kahden asteen skenaarioissa malli ratkaisee toteutettavat päästönvähennystoimet siten, että maapallon keskilämpötilan nousu rajoittuu mallin mukaan 2 asteeseen vuoteen 2100 mennessä. Näissä skenaarioissa oletetaan maailmanlaajuiset kasvihuonekaasupäästöjen markkinat, mikä vastaa jatkuvaa globalisoitumiskehitystä. Mallituloksista saadaan arvio maailmanlaajuisesti kustannustehokkaimmasta tavasta saavuttaa kahden asteen tavoite.

Alueellinen maailma -skenaario kuvaa kehityssuuntausta protektionistisempia markkinoita kohti. Tässä skenaariossa on oletettu alueelliset, globalisaatiokehitystä estävät politiikat ja suljetummat markkinat.

Maailmantaloutta koskevien VATT:n tulosten keskeinen ero oli alueellisten talouksien rakenteessa. Alueellinen maailma -skenaariossa maailmantalous on vuonna 2050 vain 2–3 % pienempi kuin perusurassa. Talouden rakenne sektoreiden välillä on kuitenkin erilainen. Tulosten mukaan muutos modernia taloutta kohti on hitaampaa, kun protektionistiset ja nationalistiset piirteet voimistuvat. Alueellinen maailma -skenaariossa teollisuustuotannon rakenne on painottuneempi energiaintensiivisten teollisuusalojen, kuten kemian-, metalli- ja terästeollisuuden, suuntaan.

Esitettyjen pitkän aikavälin skenaarioiden perusteella voidaan arvioida, että teknologian käyttöönoton ja kehittämisen sekä kansainvälisen ilmastoyhteistyön avulla kestävä energiatalous on mahdollista. Energijärjestelmäskenaarioiden tulosten mukaan maailmantalouden loppuenergian käytön intensiteetin tulisi laskea yli 2 % vuodessa maapallon keskilämpötilan nousun rajoittamiseksi alle kahteen asteeseen tällä vuosisadalla esiteolliseen aikaan näh-

den. Tällainen kehitys edellyttäisi huomattavaa nopeutumista vuosien 1990 ja 2005 välillä toteutuneeseen 1,1 %:n keskimääräiseen vuosimuu-
tokseen verrattuna.

Merkittävämpien teknologiamuutosten täytyisi kuitenkin tapahtua energiantuotannossa (kuva 3). Vuoteen 2050 asti tuulivoima, ydinvoima, biomassapohjainen sähköntuotanto ja hiilidioksidin erotus- ja varastointiteknologialla varustetut voimalaitokset ovat kaikki erittäin tärkeässä osassa kestävämmän energijärjestelmän saavuttamiseksi. Aurinkoenergiassa on suuria mahdollisuuksia, mutta sen kustannusten täytyisi laskea melko jyrkästi, jotta aurinkovoimalla voisi olla merkittävä osuus maailman sähköntuotannosta ennen vuotta 2050.

Kestävä energijärjestelmä vaatii erittäin suuret investoinnit uuteen energiateknologiaan vuoteen 2050 mennessä. Pelkästään sähköntuotannossa maailmanlaajuinen vuosikustannus uusiin laitoksiin on yli tuhat miljardia euroa, ja tehokkaampiin loppukäyttökäyttöteknologioihin tarvittavat investointikustannukset ovat myös suuret kaikilla loppukäyttösektoreilla. Vaikka investointien rahoitus on haastavaa, vaadittava kehitys luo myös valtavat markkinat teknologian kehittäjille ja valmistajille. Kuvassa 4 on esitetty joidenkin sähkön- ja lämmöntuotantoteknologioiden vuosittainen investointitarve kahden asteen skenaariossa. Perusura-skenaariossa fossiilisten polttoaineiden, erityisesti hiilen, käyttö kasvaa nopeasti, kun taas kahden asteen skenaarioissa uusiutuvat energialähteet ja ydinvoima hallitsevat.

Vuosittaiset investoinnit tuuli- ja biomassapohjaiseen sähköntuotantoon maailmassa vuonna 2050 ovat näissä skenaarioissa lähes 300 miljardia euroa vuodessa. CCS:llä varustetun sähköntuotannon vuosi-investoinnit vuonna 2050 ovat samaa luokkaa. Myös ydinvoima- ja vesivoimainvestoinnit kasvavat voimakkaasti vuosien 2020 ja 2050 välillä. On kuitenkin muistettava, että ydinvoima- ja suuren kokoluokan vesivoimainvestoinnit ovat yleensä kansallisten poliittisten päätösten säätlemiä, mikä saattaa estää näiden investointien toteutumista tulevaisuudessa.

Yhteenveto

Teknologisia ratkaisuja energiankäytön kokonaistehokkuuden parantamiseksi ja energian tuotannosta ja käytöstä aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi on olemassa laaja joukko. Monet päästöttömiin energianlähteisiin perustuvista tai vähäpäästöisistä edistyksellisistä energiantuotantoteknologioista ovat tällä hetkellä aktiivisessa kehitysvaiheessa. Useat teknologioista eivät ole vielä kaupallisia tai ovat vielä markkinoille astumisen alkuvaiheessa. *Energy Visions 2050* -kirjassa (VTT 2009) on esitetty lukuisia esimerkkejä tällaisista tulevaisuuden energiantuotantoteknologioista.

Pitkällä aikavälillä myös useissa loppukäyttökohteissa voidaan saavuttaa erittäin huomattavia parannuksia lukuisten teknologioiden avulla. Energijärjestelmien luontaisesti hitaan uusiutumisen takia suuret parannukset lyhyellä aikavälillä nopeiden teknologiasiirtymien ansiosta voivat yleisesti ottaen olla melko kalliita. Kuitenkin ajan myötä teknisesti mahdollisten ratkaisujen voidaan olettaa tulevan yhä kilpailukykyisemmäksi ja enenevästi käyttöön.

Vaikka ilmastonmuutoksen hillintä vaatii tulosten mukaan suuria muutoksia jo seuraavien vuosikymmenien aikana, teknologian kehittyminen saattaa ajan myötä avata yhä kestävämpiä energiaratkaisuja. Eri aurinkoenergiateknologiat tulevat asteittain yhä kilpailukykyisemmiksi, ja niillä voi hyvinkin olla merkittävä rooli maailman energijärjestelmässä joidenkin vuosikymmenien kuluttua. Lisäksi edistykselliset ydinvoimalaitosteknologiat, sisältäen fuusion, saattavat olla avainroolissa hiilidioksidipäästöttömässä vedyntuotannossa ja siten myötävaikuttaa lopulliseen fossiilisista polttoaineista luopumiseen.

Ilmastonmuutoksen hillintään, energian saatavuuteen ja energiaturvallisuuteen liittyvät haasteet vaativat tulevaisuudessa laajoja investointeja energian käyttöön ja tuotantoon. Uusil-

le ja tehokkaille teknologioille avautuvat valtavat markkinat, ja innovaatioille tulee olemaan suuri tarve. Tämä voi luoda uuden liiketoimintapohjan ja avata uusia mahdollisuuksia teknologian kehittäjille, suunnittelijoille ja palveluntarjoajille sekä luoda kokonaisia uusia teollisuuden lajeja.

Kymmeniä vuosia eteenpäin tehtävien tarkastelujen epävarmuus on luonnollisesti suuri. Tuloksiin vaikuttavat mm. oletukset ilmastonmuutoksen kehityksestä ja erityisesti ns. ilmaston herkkyydestä. Talouden ja teknologian kehityksen arviointi sisältää paljon epävarmuutta. Uudet teknologian läpimurrot esimerkiksi tieto- ja viestintäteknologiassa, nanoteknologiassa, bioteknologiassa tai materiaalitieteissä saattavat mahdollistaa tämän päivän arviointikyvyn ulkopuolella olevia ratkaisuja tulevina vuosikymmeninä. Innovaatioita, teknologian ja talouden kehitystä on hyvin haastavaa ennakoida pitkällä aikavälillä, joten toteutuva kehitys voi muodostua aivan erilaiseksi kuin mitä asiantuntija-arvioiden tai laskennallisten mallien avulla on pystytty ennakoimaan.

Viitteet

- IPCC 2007. *Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (toim.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lehtilä, Antti; Honkatukia, Juha; Koljonen, Tiina; Niemi, Janne. 2009. Luku 6: Scenarios on energy futures. Teoksessa *Energy Visions 2050*, 311–372.
- VTT 2009. *Energy Visions 2050*. VTT, Espoo ja Edita, Helsinki.

Lasse Similä on tutkija ja Ilkka Savolainen tutkimusprofessori Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa. Artikkelin perustuu pääosin Savolaisen Tekniikan päivillä 15.1.2010 pitämään esitelmään ja VTT:llä laadittuun *Energy Visions 2050* -kirjaan.