

Teknologiapolut 2050

Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa

Teknologiapolut 2050

Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa

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

Ilkka Savolainen, Lassi Similä,
Sanna Syri & Mikael Ohlström (toim.)

ISBN 978-951-38-7207-6 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7208-3 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2008

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026

Korjattu lisäpainos

Kannen kuva: Leonardo da Vincin (1452–1519) tutkielma ikiliikkujasta.

Lähde: http://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page (Wikimedia commons)

Toimitus Maini Manninen

Tekstin valmistus Tarja Haapalainen

Edita Prima Oy, Helsinki 2008

Teknologiapolut 2050. Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian laatimista varten [Technology pathways 2050. Deep greenhouse gas emission reductions enabled by technology in Finland. Background report for preparing the national climate and energy strategy]. Ilkka Savolainen, Lassi Similä, Sanna Syri & Mikael Ohlström (toim.). Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2432. 215 s.

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

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaadittavat suuret kasvihuonekaasupäästöjen vähenykset tulevat mullistamaan nykyisen pääosin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan maailman energiajärjestelmän. Energiatehokkuuden parantaminen ja uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen ovat keskeisiä keinoja päästöjen vähentämisessä.

Teknologian mahdollistamat keinot ovat merkittävä osa kokonaisuutta, jolla kasvihuonekaasupäästöjen rajoitukseen pyritään. Tässä raportissa esitellään teknologisia keinoja ja arvioidaan niiden mahdollisuuksia Suomen kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamiseksi. Raportissa käsitellään sekä energian tuotantoon että sen eri käyttösektoreihin – teollisuus-, liikenne- ja rakennussektoriin – liittyviä teknologioita ja niiden kehitystä tulevaisuudessa. Tarkastelu ulottuu aina vuoteen 2050 saakka, ja erityisenä huomion kohteena on myös vuosi 2020, jota koskien Euroopan unioni on julkistanut sitovat tavoitteensa.

Selvityksen mukaan teknologisia keinoja päästöjen vähentämiseksi on olemassa runsaasti erilaisia kaikilla sektoreilla. Monet teknologioista ovat jo markkinoilla ja siten heti saatavilla ja käyttöön otettavissa. Päästöjä vähentävien teknologioiden käyttöönottoa hidastavat kuitenkin kustannukset ja investointien uusiutumisen hitaus. Esimerkiksi energiantuotantolaitosten käyttöikä on tyypillisesti 20–50 vuotta, ja rakennusten käyttöikä luokkaa 50–100 vuotta.

Työn tuloksia hyödyntämällä suoritetaan Suomen energiajärjestelmää kuvaavalla TIMES-mallilla skenaariolaskelmat, joista saadaan arvio siitä, mitkä päästöjä hillitsevista teknologioista olisi taloudellisesti edullisinta ottaa käyttöön. Skenaariotyön tulokset julkaistaan erillisenä raporttina.

Teknologiapolut 2050. Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian laatimista varten [Technology pathways 2050. Deep greenhouse gas emission reductions enabled by technology in Finland. Background report for preparing the national climate and energy strategy]. Ilkka Savolainen, Lassi Similä, Sanna Syri & Mikael Ohlström (eds.). Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2432. 215 p.

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

Abstract

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

Technology enables significant greenhouse gas emission reductions. In this report, technology opportunities to achieve emission reductions in Finland are reviewed and their potential is assessed. Both energy production technologies and technologies applied in all the end-use sectors – industry, transport and buildings sectors – are reviewed in the report. Assessment of technology development in the future is strongly emphasized in the report. The timeframe extends to 2050. 2020 is also of particular interest since the European Union has set its intermediate greenhouse gas emission reduction targets for the same year.

According to the report, several opportunities to achieve emission reductions exist in all the sectors. A major part of the technology opportunities are already on the market and therefore immediately applicable. However, adoption is restricted by costs and long investment cycles in many of the applications. For example, the technical lifetime of power plants is typically 20 to 50 years, and the lifetime of buildings ranges typically between 50 to 100 years.

By utilizing the results of this study, scenario calculations for the Finnish energy system using the TIMES energy system model have also been carried out. The calculations provide us with estimates on which technologies would be economically optimal to apply in order to reach the emission reduction targets. The results of the scenario calculations are documented in a separate report.

Alkusanat

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

Tässä raportissa esitellään teknologisia keinoja ja arvioidaan niiden mahdollisuuksia Suomen kasvihuonekaasupäästöjen pitkän ajan rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi. Tutkimuksen ja kehityksen avulla voidaan lisätä päästöjen rajoittamisen mahdollisuuksia ja alentaa niiden kustannuksia. Päästöjä rajoittavan teknologian käyttöönottoa toimijoiden keskuudessa voidaan pyrkiä lisäämään erilaisilla ohjaukeinoilla, joita ovat esimerkiksi investointituet, verohelpotukset ja päästökauppa sekä -verot. Tutkimukseen ja kehitykseen suunnattavat panokset ja ohjaukeinojen valinta ovat olennaisessa osassa päästöjen rajoittamistavoitteiden tehokkaaksi ja kokonaistalouden kannalta optimaaliseksi saavuttamiseksi.

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

Tekesin yhdyshenkilönä hankkeessa on ollut teknologia-asiantuntija Marjatta Aarniala, ja TEM:n yhdyshenkilönä yli-insinööri Pentti Puhakka. Hankkeen aihepiiristä järjestettiin 12.2.2008 asiantuntijaseminaari, jossa esitettyjä näkökulmia ja parannusehdotuksia on huomioitu raportin laatimisessa. Raportin ovat kirjoittaneet seuraavat henkilöt VTT:stä: Ilkka Savolainen (luvut 1–2, kappale 3.7, luku 7), Lassi Similä (luvut 1–2, kappale 6.3, luku 7), Satu Helynen ja Martti Flyktman (kappaleet 3.1–3.3), Esa Peltola ja Hannele Holttinen (kappale 3.4), Tomi J. Lindroos (kappale 3.5), Seppo Vuori (kappale 3.6), Matti Nieminen (kappale 3.7), Rolf Rosenberg (kappale 3.8), Juha Hakala ja Jussi Manninen (kappaleet 4.1–4.3), Eemeli Tsupari (kappaleet 4.4 ja 4.6), Pertti Vastamäki (kappale 4.5), Kari Mäkelä, Tuuli Järvi ja Jukka Räsänen (kappale 5.1), Juhani Laurikko (kappale 5.2), Göran Koreneff (Hybridisähköautojen vaikutus sähköjärjestelmään kappaleessa 5.2), Tuula Mäkinen (kappale 5.3), Pekka Tuomaala (kappaleet 6.1–6.2), Seppo Kärkkäinen (kappale 6.4), Pekka Lahti (kappale 6.5) ja Sanna Syri (luku 7). Raportin ovat toimittaneet Ilkka Savolainen, Lassi Similä, Sanna Syri ja Mikael Ohlström VTT:stä. Mikael Ohlström osallistui toimittamiseen 17.12.2007 asti.

Ilkka Savolainen

Lassi Similä

Sanna Syri

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	10
Lähdeviitteet ja lisätietoja.....	12
2. Ilmastonmuutoksen hillintä ja teknologian kehittyminen.....	13
2.1 Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys ja lähteet.....	13
2.2 Energiajärjestelmä.....	14
2.3 Ilmaston muuttumisen vaikutus energiajärjestelmään.....	17
2.4 Päästöjen rajoituksen tavoitteet ja energiajärjestelmän kehittyminen.....	18
2.5 Pitkän aikavälin skenaariot.....	22
2.6 Muutoksen rajoitteita, hitaus ja kustannukset.....	23
2.7 Teknologioiden tulo markkinoille ja käyttöönotto.....	25
2.8 Yhteenveto teknologian mahdollisuuksista.....	26
Lähdeviitteet ja lisätietoja.....	28
3. Energiantuotantoteknologiat ja tehostamismahdollisuudet.....	30
3.1 Bioenergian käytön lisäämisen teknologiset haasteet.....	30
3.2 Biopolttoaineketjut.....	30
3.2.1 Metsähake.....	30
3.2.2 Peltoenergia.....	32
3.2.3 Kierrätyspolttoaineet.....	32
3.2.4 Uudet biomassat.....	33
3.2.5 Metsäteollisuuden sivutuotteet.....	33
3.2.6 Yhteenveto polttoaineiden saatavuudesta ja kustannustasosta.....	34
3.3 Polttoon perustuvat sähkön ja lämmön tuotannon teknologiat.....	35
3.3.1 Biopolttoaineiden käsittelytekniikat.....	35
3.3.2 Biomassan pienkäyttö.....	35
3.3.3 Lämpökeskukset.....	36
3.3.4 Pienen kokoluokan yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto.....	36
3.3.5 Suuren kokoluokan yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto.....	37
3.3.6 Seospoltto hiilen pölypolttokattiloissa.....	38
3.3.7 Uudet suuret CHP- ja lauhdelaitokset.....	38
3.3.8 Kustannuskehitys.....	39
3.4 Tuulienergia.....	40
3.4.1 Nykytilanne.....	40

3.4.2	Tuulivoimateknologian kehitystrendejä.....	43
3.4.3	Tuuliolosuhteet ja tuulivoimatuotannon lisäysmahdollisuudet Suomessa.....	43
3.4.4	Tuulivoiman tuotantokustannukset ja kannattavuus	44
3.4.5	Kehityskenaarioita.....	44
3.4.6	Tavoitteet ja toimenpiteet.....	47
3.4.7	Ympäristövaikutukset	47
3.4.8	Taloudelliset vaikutukset	48
3.5	Muut uusiutuvat energianlähteet ja hajautettu tuotanto yleensä.....	48
3.5.1	Aurinkoenergia.....	49
3.5.2	Aaltoenergia	53
3.6	Ydinvoiman kehitysnäkymät.....	54
3.6.1	Nykyiset ydinvoimalaitokset ja niiden kehittämismahdollisuudet	55
3.6.2	Ydinvoiman käytön laajentaminen Suomessa ja muissa maissa.....	58
3.6.3	Pitkän aikavälin uudet fissioreaktorit.....	59
3.6.4	Fuusioreaktorit	61
3.6.5	Kehityskenaarioita.....	61
3.7	Hiilidioksidin erotus ja varastointi (CCS).....	63
3.7.1	Yleistä	63
3.7.2	Erotusteknologiat	63
3.7.3	Hiilidioksidin siirto ja varastointi.....	65
3.7.4	Teknologian kypsyys	66
3.7.5	CCS:n merkitys Suomelle.....	69
3.7.6	CCS:n tulevaisuus	69
3.8	Polttokennot ja vetytalous	70
3.8.1	Johdanto	70
3.8.2	Polttokenno- ja vetyteknologian pääsy markkinoille.....	71
3.8.3	Polttokenno- ja vetyteknologian vaikutukset.....	73
	Lähdeviitteet ja lisätietoja.....	76
4.	Teollisuusprosessit ja tehostamismahdollisuudet	80
4.1	Energiankäyttö teollisuudessa	80
4.2	Yleiset tehostamismahdollisuudet.....	81
4.2.1	Moottorikäytöt.....	81
4.2.2	Moottorit	82
4.2.3	Prosessikuormat	82
4.2.4	Lämmönsiirtimet ja lämpöpumput.....	83
4.2.5	Valaistus.....	83
4.3	Metsäteollisuus.....	83
4.3.1	Metsäteollisuuden energiankulutus.....	86
4.3.2	Kemiallisen massan valmistus	89
4.3.3	Mekaanisen massan valmistus	92

4.3.4	Kiertokuitumassan valmistus	94
4.3.5	Paperin ja kartongin valmistus	95
4.4	Terästeollisuus (metalliteollisuus).....	97
4.4.1	Pitkän aikavälin ennuste terästeollisuudesta	104
4.5	Kemian perusteollisuus	106
4.5.1	Kemianteollisuuden kasvihuonekaasupäästöt.....	106
4.5.2	Kemianteollisuuden energiankulutus	107
4.5.3	Öljynjalostus	109
4.5.4	Lannoiteteollisuus	110
4.5.5	Muiden peruskemikaalien valmistus.....	110
4.6	Mineraaliteollisuus	113
4.6.1	Sementin valmistus	115
4.6.2	Poltetun kalkin valmistus	116
4.6.3	Yhteenveto mineraaliteollisuudesta	118
4.6.4	Pitkän aikavälin ennuste mineraaliteollisuudesta.....	121
	Lähdeviitteet ja lisätietoja	123
5.	Liikennesektori ja työkoneet.....	127
5.1	Liikennejärjestelmä ja logistiikka.....	127
5.1.1	Liikennejärjestelmä osana yhteiskuntaa.....	127
5.1.2	Liikenneinfrastruktuurin kehittäminen.....	128
5.1.3	Henkilöliikenteen vaihtoehdot	129
5.1.4	Logistiikka ja elinkeinoelämän kuljetukset.....	130
5.1.5	Liikenteen informaatiojärjestelmät ja muut telematiikkapalvelut.....	130
5.2	Ajoneuvo- ja polttoainetekniikan kehittyminen	132
5.2.1	Yleiset linjat	132
5.2.2	Mäntämoottoritekniikan kehitysmahdollisuuksia	134
5.2.3	Hybridikäyttö parantaa moottorin toimintaa ja hyötysuhdetta.....	136
5.2.4	Raskas kuljetuskalusto	139
5.2.5	Polttokennosta 2000-luvun auton voimalaite.....	139
5.2.6	Polttoaineiden jakeluinfrastruktuuri.....	140
5.2.7	Polttokennoautojen markkinoilletulo ja penetraatio	141
5.2.8	Energian tarpeen pienentäminen	144
5.2.9	Muut kulkuneuvot ja työkoneet	148
5.3	Biopolttoaineet	151
5.3.1	Etanoli	153
5.3.2	Biodiesel (FAME).....	154
5.3.3	Biokaasut.....	154
5.3.4	Biodiesel (vetykäsittely).....	155
5.3.5	Synteettiset polttoaineet (kaasutus).....	155
5.3.6	Pyrolyysitekniikalla tuotetut bioöljyt.....	156
	Lähdeviitteet ja lisätietoja	157

6. Rakennussektori.....	159
6.1 Rakennusten energiankäyttö.....	159
6.2 Rakennusten lämmityksen ja talotekniikan energiansäästöpotentiaali.....	161
6.2.1 Rakennusteknologioiden ja rakennuskannan kehitys.....	161
6.2.2 Energiansäästöskenaarioita	171
6.2.3 Johtopäätöksiä	175
6.3 Sähkölaitteet ja valaistus	176
6.3.1 Kotitaloudet.....	177
6.3.2 Palvelut.....	185
6.3.3 Johtopäätöksiä	186
6.4 Sähkön kysynnän hallinta (DSM, Demand Side Management).....	188
6.4.1 Kysynnän hallinnan tavoitteet.....	188
6.4.2 Kysynnän hallinnan keinot.....	189
6.4.3 Kysynnän hallinnan teknologiat.....	189
6.4.4 DSM:n vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin.....	191
6.5 Yhdyskuntasuunnittelu	192
6.5.1 Yhdyskuntasuunnittelun mahdollisuudet ja tavoitteet	192
6.5.2 Alue- ja yhdyskuntarakenteen vaikutukset	197
Lähdeviitteet ja lisätietoja	205
7. Yhteenveto ja johtopäätöksiä.....	208

1. Johdanto

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

IPCC:n (2007) mukaan ilmakehän nykyinen CO₂-pitoisuus on noin 380 ppm, muista Kioton kaasuista, lähinnä metaanista ja dityppioksidista, aiheutuva hiilidioksidiekvivalenttinen pitoisuus on noin 50 ppmCO₂ekv. Kahden asteen lämpötilan nousua vastaava pitoisuus on 450 ppmCO₂ekv, jos ilmaston herkkyydeksi oletetaan IPCC:n paras arvio 3 °C /550 ppm. IPCC:n mukaan arvion ilmaston herkkyyden epävarmuusväli on huomattava, 2–4,5 °C, eivätkä 4,5 astetta suuremmat arvot ole kokonaan poissuljettuja. Nykyinen pitoisuuden kasvu on noin 2 ppm/vuosi, joten Kioton kaasujen hiilidioksidiekvivalenttipitoisuus saavuttaa 450 ppm tason noin kymmenessä vuodessa. Jos otetaan huomioon ilmakehässä jo olevat CFC-kaasut, ekvivalenttinen pitoisuus on 455 ppm, siis yli 2 C-astetta vastaavan pitoisuustason. Näiden seikkojen vuoksi IPCC päättyy varsin rajuihin päästönvähennystavoitteisiin, jos lämpötilarajoite on noin kaksi astetta. Käytännössä lämpötilan nousua viivästyttävät kuitenkin ihmisen toimesta ilmakehään tulevat hiukkaspäästöt, jotka pienentävät säteilypakotetta ja ilmakehän laskennallista ekvivalenttipitoisuutta, sekä valtamerien suuri lämpökapasiteetti.¹

Koska maailman väestö ja talous kasvavat, kasvihuonekaasujen päästöjen rajoitustavoite on hyvin haastava. Kehittyneissä maissa päästöt ja varallisuus henkeä kohti ovat suuremmat kuin kehitysmaissa, ja on odotettavissa, että päästöjen rajoittamisen tavoitteet tulevat tulevaisuudessa päästönrajoitussopimuksissa olemaan suuremmat kehittyneissä maissa kuin kehitysmaissa.

YK:n vuonna 1992 solmitun ilmastopöytäkirjan (United Nations' Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) tavoite on vakauttaa ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuudet vaarattomalle tasolle. Vuonna 1997 sovittiin ilmastopöytäkirjaan liittyen ns. Kioton pöytäkirjasta, jolla rajoitetaan kehittyneiden maiden päästöjä kaudella 2008–2012. Joulukuussa 2007 sovittiin Baliin käydyissä ilmastoneuvotteluissa, että vuoden

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

2009 loppuun mennessä pyritään neuvotteluissa uuteen laajaan päästöjenrajoituspöytäkirjaan, jossa rajoitetaan sekä kehittyneiden maiden että kehitysmaiden päästöjä Kioton kauden jälkeen kansallisesti soveltuvilla toimilla ottaen huomioon kestävä kehitys. Myös Yhdysvallat on mukana neuvotteluissa, vaikka se jäi pois Kioton pöytäkirjasta.

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

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

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

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

Pyrkimys kestäväan kehitykseen on hyväksytty laajasti pitkän ajan poliittiseksi tavoitteeksi, ja yksi osa tätä kehitystä on kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen. Muutospaineita yrityksille syntyy myös muiden ympäristövaikutusten vähentämisestä. Eri-laisten tavoitteiden yhteensovittaminen ei aina ole helppoa edes eri ympäristökysymysten tai päästökomponenttien välillä.

Tässä katsauksessa arvioidaan teknologian kehitystä ja mahdollisuuksia sellaisen pieni-päästöisen, ”vähähiilisen”, yhteiskunnan syntyyn, jolla voidaan päästä hyvin voimakkaaseen päästöjen rajoittumiseen vuoteen 2050 mennessä. Luvussa 2 esitetään katsaus ilmastonmuutoksen hillintään liittyviin seikkoihin ja teknologian rooliin siinä. Luvusta 3 lähtien käsitellään teknologioita aloittain. Raportin lopussa pohditaan teknologian kehityspolkuja kokonaisuutena ja esitetään yhteenveto. Raportin luonnosta käsiteltiin 12.2.2008 Tekesissä pidetyssä asiantuntijaseminaarissa, jossa esitettiin raporttiin korjauksia ja täydennyksiä. Katsaukseen liittyvät skenaariotarkastelut kuvataan erillisessä raportissa. Tarkastelut tehdään VTT:n Suomen päästöjä kuvaavalla TIMES-järjestelmämallilla. Mallissa valitaan teknologiat niin, että kokonaiskustannukset minimoituvat samalla, kun täytetään annetut reunaehdot ja vaatimukset.

Lähdeviitteet ja lisätietoja

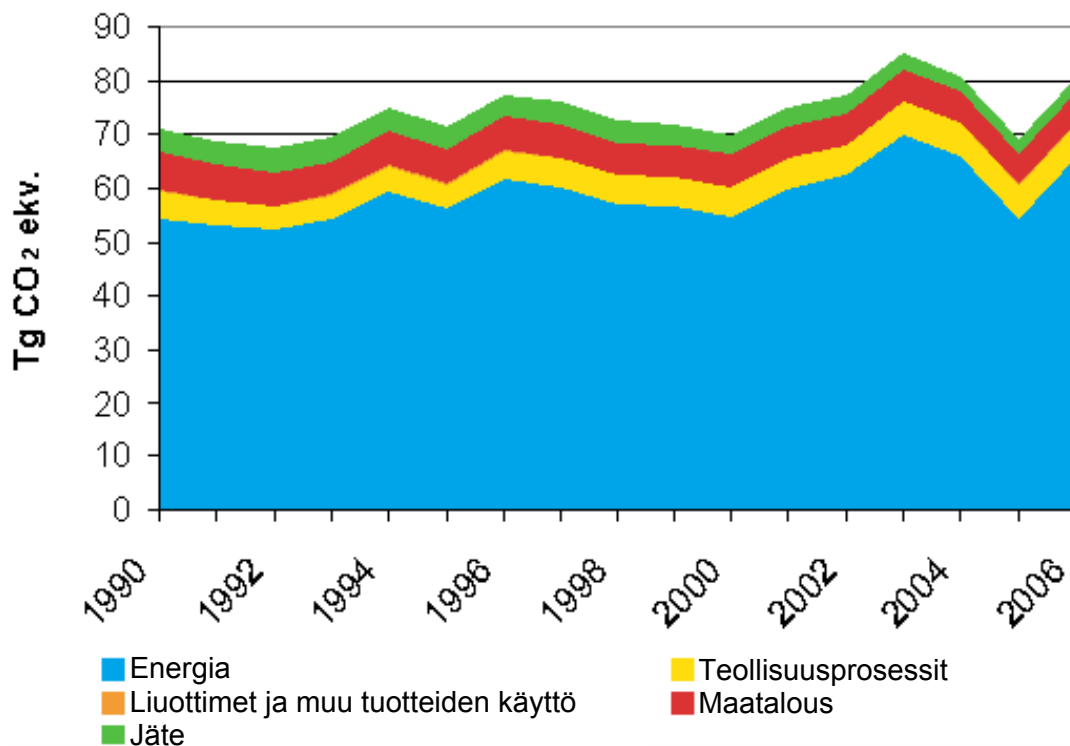
IPCC 2007. Climate Change 2007. Mitigation of climate change. Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>.

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

2. Ilmastonmuutoksen hillintä ja teknologian kehittyminen

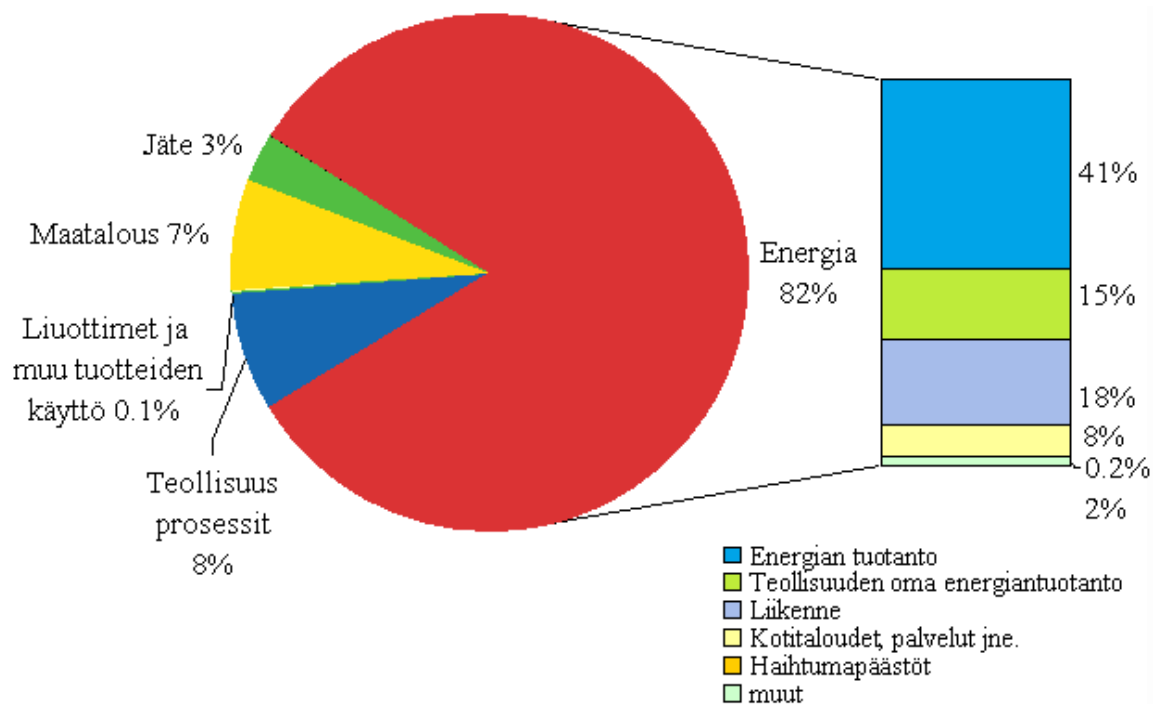
2.1 Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys ja lähteet

Kuvassa 2.1 on esitetty Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys sektoreittain. Kuvasta nähdään, että energiasektori (joka pitää sisällään myös liikenteen, palvelujen ja kotitalouksien energiankäytön) on merkittävin Suomen kasvihuonekaasupäästöjen lähteistä. Vuonna 2006 82 % Suomen 80 miljoonan hiilidioksidiekvivalenttitonnin päästöistä aiheutui energiasektorin toiminnoista.



Kuva 2.1. Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys sektoreittain 1990–2006. (Tilastokeskus 2007a)

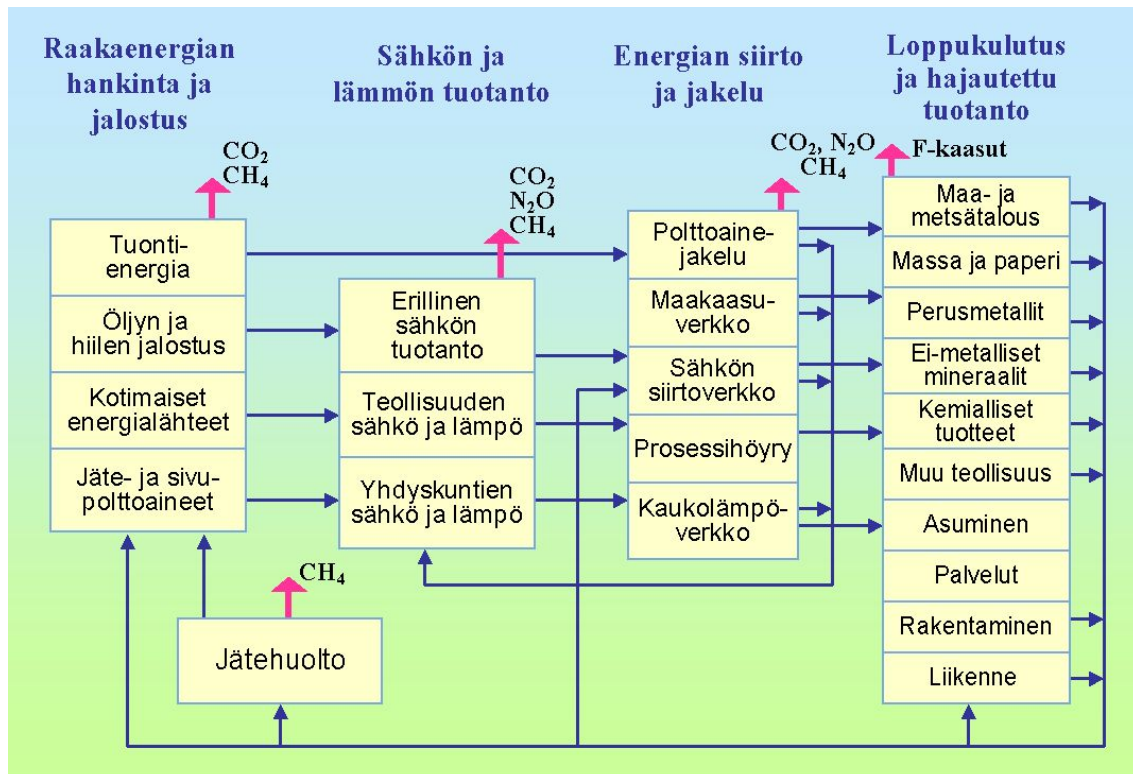
Energiasektorin kasvihuonekaasupäästöt Suomessa vuonna 2006 jakautuivat alasektoreittain kuvan 2.2 mukaisesti. Merkittävimmän päästölähteen, energian tuotannon, päästöt koostuvat fossiilisten polttoaineiden – kuten kivihiiilen ja maakaasun – polttoon perustuvasta sähkön ja kaukolämmön tuotannon päästöistä. Muita merkittäviä kasvihuonekaasupäästöjen lähteitä ovat teollisuusprosessit, maatalous ja jäte.



Kuva 2.2. Kasvihuonekaasupäästöt sektoreittain vuonna 2006. (Tilastokeskus 2007a)

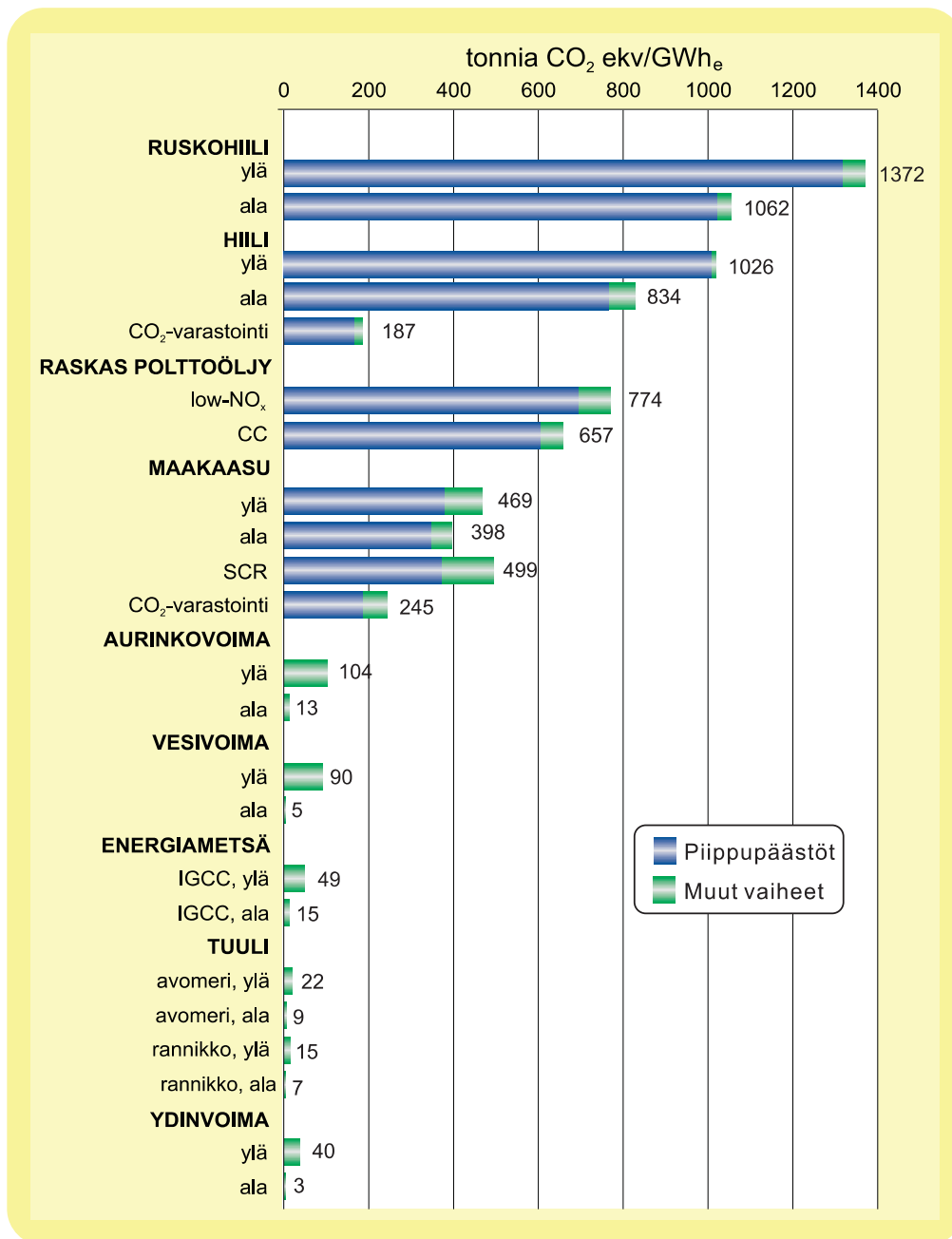
2.2 Energiajärjestelmä

Energiajärjestelmän voidaan esittää koostuvan energian lähteistä, muunnosta, jakelusta, käytöstä ja energian tuottamista palveluista (kuva 2.3). Esimerkiksi kun energian lähteenä on kivihiili, voimalaitoksessa kivihiilen polttamisen tuottama energia voidaan muuntaa sähköksi, joka sähköverkkoa pitkin siirretään käytettäväksi kuluttajalle, jossa sähkö tuottaa energiapalvelua, vaikkapa valaistusta. Kokonaisuutena energiajärjestelmä on varsin mutkikas. Energialähteitä on monia, samoin muuntotapoja, energiaa voidaan jaella eri muodoissa (sähkö, lämpö, polttoaine, prosessihöyry) ja käyttötapoja ja energia-palveluja on hyvin monenlaisia.



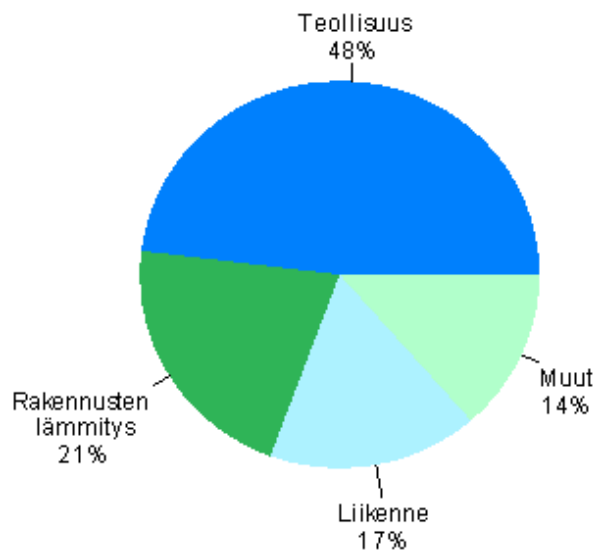
Kuva 2.3. Energiajärjestelmän periaatteellinen kaavio. Energiapalveluja tuotetaan kokonaisuudella, joka koostuu raakaenergiasta (energialähteistä), raakaenergian jalostuksesta ja energian tuotannosta (energian konversio), energian siirrosta ja jakelusta sekä loppukulutuksesta (energian käytöstä).

Eri sähköntuotantotapojen ominaispäästöjä esitetään kuvassa 2.4. Kuvassa 2.4 on tarkasteltu ainoastaan erillistä sähköntuotantoa. Päästöjä aiheutuu muissakin kuvan 2.3 mukaisissa energiajärjestelmän osissa.



Kuva 2.4. Eri energiantuotantomuotojen kasvihuonekaasupäästöt ekvivalentteina hiilidioksiditonneina tuotettua sähköenergiagigawattituntia kohti (WEC 2004, IPCC 2007).

Kuva 2.5 esittää energian loppukäytön jakaumaa Suomessa vuonna 2005 Tilastokeskuksen käyttämän luokituksen mukaisesti. Energian loppukäyttö vuonna 2005 oli yhteensä 1066 PJ, ja ennakkotiedon mukaan se kasvoi 1123 PJ:hin vuonna 2006 (Tilastokeskus 2007b). Teollisuus on ollut jo pitkään merkittävin energian loppukäyttösektori Suomessa. Muut-sektori sisältää kotitalouksien, julkisen ja yksityisen palvelusektorin, maa- ja metsätalouden sekä rakennustoiminnan sähkön ja polttoaineiden käytön.



Kuva 2.5. Energian loppukäyttö Suomessa vuonna 2005 (Tilastokeskus 2007b).

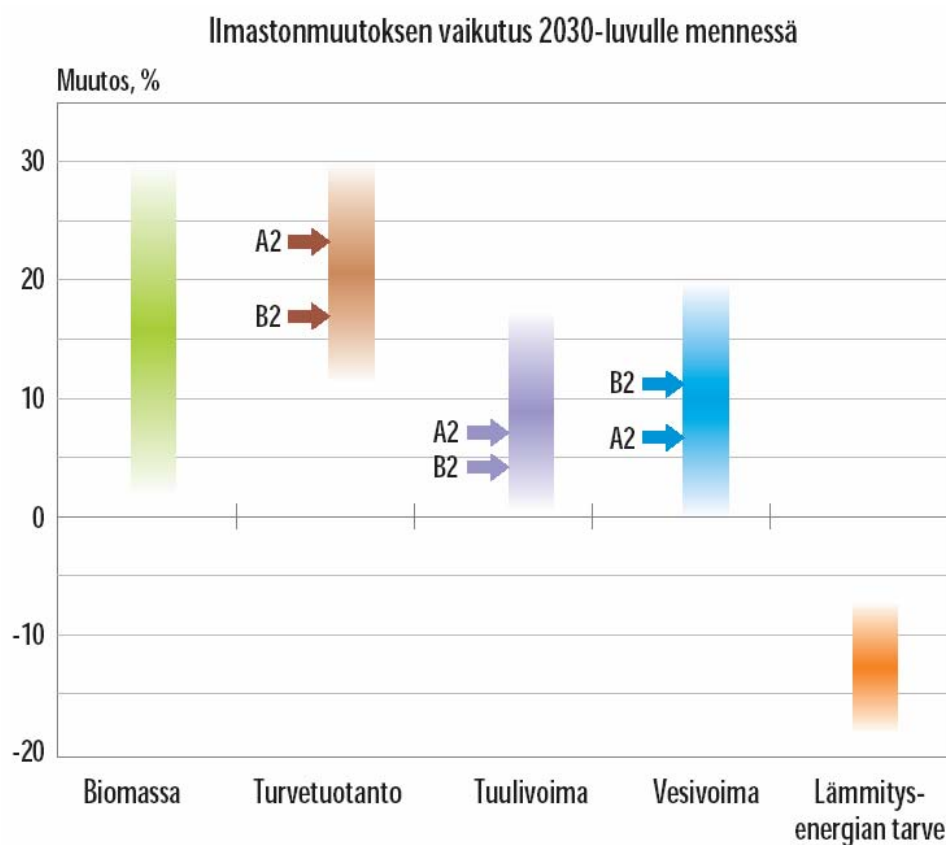
Energiapalvelun tuottamisen vaatimaan raaka-energian määrään ja tuottamisen aiheuttamiin päästöihin voidaan vaikuttaa monessa vaiheessa. Energian käytön tehokkuutta voidaan parantaa, samoin jakelun ja muunnon. Energialähteen valintaan voidaan myös vaikuttaa. Kun jokaisessa vaiheessa toteutetaan pieniäkin päästöjä vähentäviä toimia, niin niiden yhteisvaikutus voi muodostua suureksi. Muissa vaiheissa paitsi jakelussa voidaan teoreettisesti toteuttaa kymmenien prosenttien suuruisia päästövähennysoimia.

Myös tämän raportin sisältö voidaan järjestää energiajärjestelmän mutkikkuuden takia monella tavalla. Niinpä esimerkiksi raportin pääotsikkotasolla liikenteen biopolttoaineiden tuotanto olisi voitu käsitellä luvussa 3 ”Energiantuotantoteknologiat ja tehostamismahdollisuudet”. Liikenteen biopolttoaineiden tuotanto on kuitenkin tässä raportissa käsitelty liikennesektorin teknologisia näkymiä käsittelevässä luvussa 5.

2.3 Ilmaston muuttumisen vaikutus energiajärjestelmään

Ilmaston muuttuminen vaikuttaa Suomen energiatalouteen ja kasvihuonekaasupäästöihin. Lämpeneminen lisää metsän kasvua etenkin pohjoisessa, sateisuuden kasvaessa vesivoiman tuotanto hiukan lisääntyy, ja toisaalta lämpeneminen vähentää tuntuvasti talvikauden lämmittämisen tarvetta (kuva 2.6). On odotettavissa, että kesäajan sähkönkulutus lisääntyy jonkin verran kiinteistöjen jäähtymisen yleistyessä.

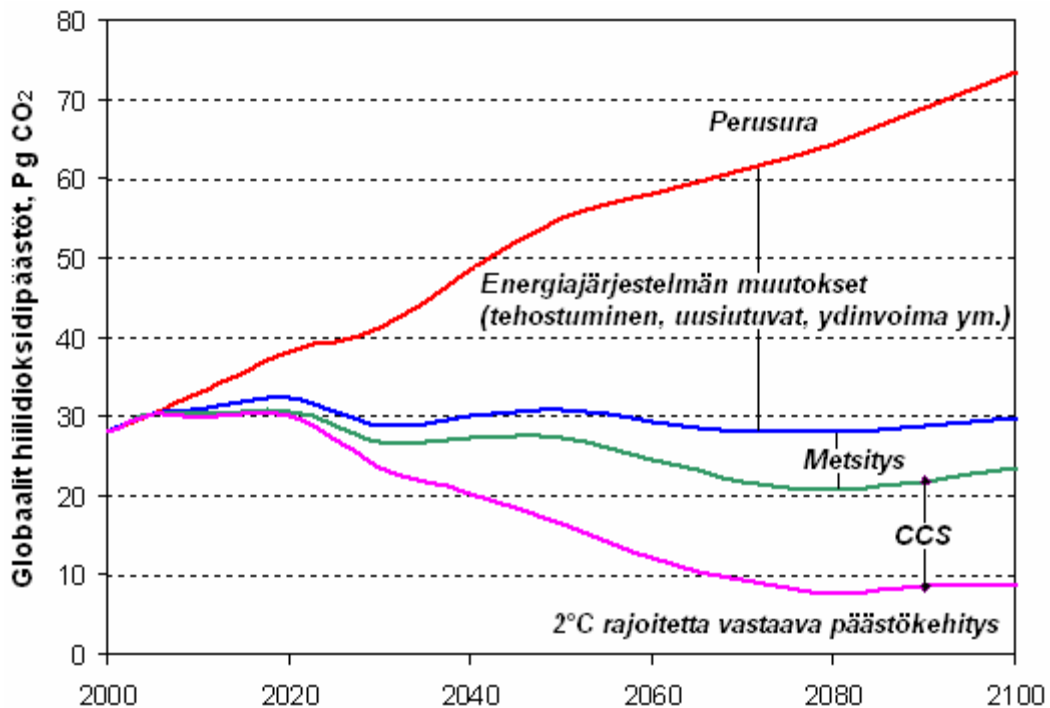
Ilmaston muuttumisella on mitä ilmeisimmin myös haitallisia vaikutuksia. Näihin vaikutuksiin sopeutuminen ja valmistautuminen vähentävät haittaa ja aiheuttavia kustannuksia. Tällaisia voivat olla mm. tulvat ja myrskyjen aiheuttamat vahingot metsissä sekä sähkön jakelussa (Martikainen et al. 2007; Kirkinen et al. 2005).



Kuva 2.6. Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta useiden energialähteiden potentiaali kasvaa, ja lämmitysenergian tarve vähenee. A2 ja B2 kuvaavat eri skenaarioita. (Tammelin et al. 2002; Savolainen et al. 2003)

2.4 Päästöjen rajoituksen tavoitteet ja energiajärjestelmän kehittyminen

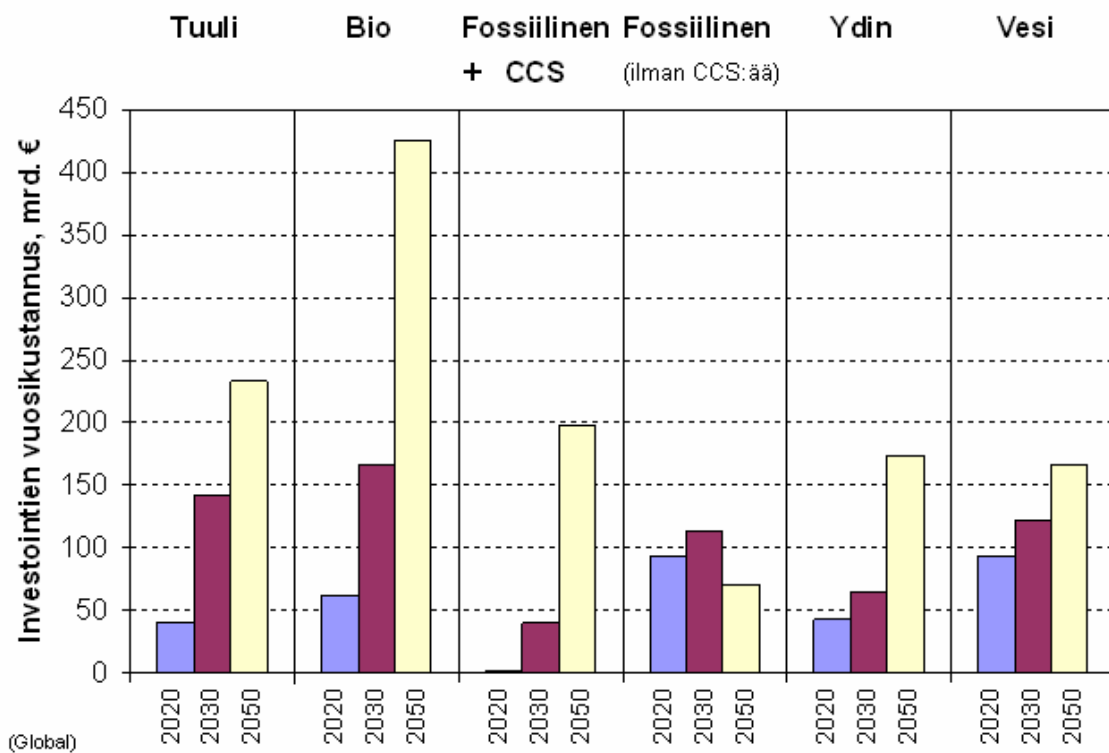
Jos tavoitteena on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden, kuten EU on esittänyt, maailman päästöjä tulee rajoittaa 50–85 % vuoteen 2050 mennessä (IPCC 2007). Kuvassa 2.7 esitetään VTT:n Global TIMES -mallilla tehty koko maailmaa koskeva skenaariotarkastelu. Malli valitsee käytettävät päästövähennyskeinot kustannustehokkuuden perusteella pyrkien minimoimaan kokonaiskustannukset.



Kuva 2.7. Global TIMES -mallilla arvioitu maailman hiilidioksidipäästöjen kehitys perusurassa ja pyrittäessä rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen. Energiajärjestelmän muutoksilla saavutetaan suurin osa päästöjen vähennyksestä. Myös metsitys ja hiilidioksidin erotus ja varastointi (CCS) ovat tärkeitä (Syri et al. 2008).

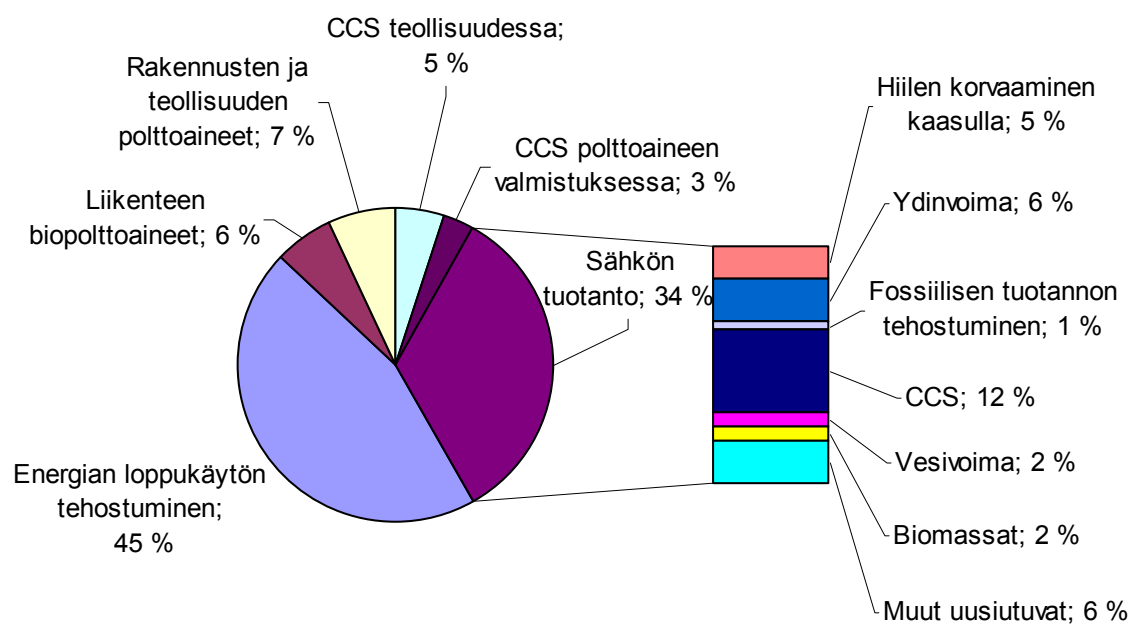
Ilmastopimusneuvottelujen yhteydessä Kioton pöytäkirjan ratifioineet maat ovat ehdottaneet kehittyneille maille 25–40 prosentin päästönvähennystä vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoteen 2000 (Bali AWG 2007). Tämä on johdettu IPCC:n vuodelle 2050 esittämästä globaalista päästönvähennystavoitteesta, jos pyritään pitämään lämpötilan nousu kahdessa asteessa. EU:n ilmoittama ehdollinen 30 %:n päästönvähennys ja sitova 20 %:n vähennys vastaavat likimain AWG:n päästönvähennyshaarukkaa. Päästöjen rajoittamisen vaikutukset energiantuotantoteknologioiden kysyntään ovat huomattavat (Kuva 2.8).

Päästöjen rajoittamisen seurauksena on odotettavissa, että rajoitustoimien marginaalikustannukset kasvavat. Tehtyjen skenaariolaskelmien mukaan (EC 2007; Norden 2007; Russ et al. 2005) on arvioitavissa, että päästökaupan hintataso nousee nykyisestä tasosta noin 20 euroa /tCO₂ tasolle 30–50 euroa vuoteen 2020 EU:ssa, jos 20 prosentin EU:n päästönvähennystavoite toteutetaan vain EU:n sisäisin toimin. Jos EU:n ehdottamaan 60–80 prosentin päästönvähennystavoitteeseen pyritään vuonna 2050, päästökaupan hintataso nousee luokkaan 50–100 euroa riippuen talouden kasvusta, päästökaupan ja muiden mekanismien laajuudesta ym.



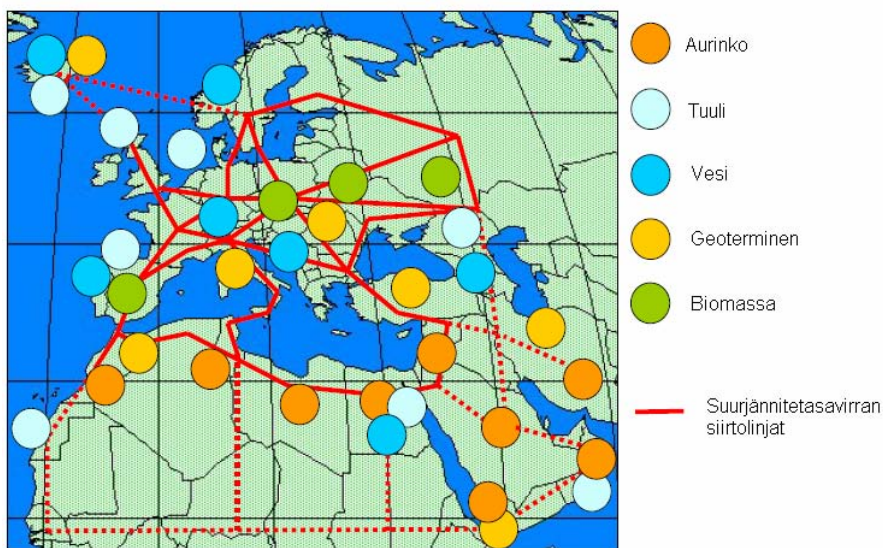
Kuva 2.8. Päästöjen rajoittamisen vaikutus energiantuotantoteknologioiden pääomakustannuksiin maailmassa (Koljonen et al. 2008). Kahden asteen tiukka rajoitustavoite lisää tuulivoima-, bioenergia-, ydinvoima- ja CCS:llä varustettua fossiilisen energian tuotantokapasiteettia ja niihin tehtyjä investointeja.

Energian loppukäytön tehokkuuden parantaminen korostuu koko energiajärjestelmän kattavissa päästönrajoitustarkasteluissa. IEA:n Energy Technology Perspectives (2006) -raportin maailmanlaajuisessa päästönvähennysskenaariossa noin 45 prosenttia vähennyksistä tulee loppukäytön tehostamisesta. Energian tuotannon ja jakelun huomioon ottaminen tarkastelussa nostaa tehokkuuden parantamisen osuuden yli puoleen päästönvähennyksistä (kuva 2.9).



Kuva 2.9. Päästöjen rajoitusten kohdistuminen eri sektoreille viitteessä (IEA 2006) tarkastellussa skenaariossa. Energian loppukäytön tehostuminen on keskeistä päästöjen vähentymisessä. (IEA 2006)

Myös energian siirron ja jakelun järjestelmä tulee muuttumaan (kuva 2.10), mikä voi mahdollistaa vähäpäästöisten teknologioiden laajamittaisemman hyödyntämisen. Sähkönsiirtojärjestelmä tulee Euroopassa integroitumaan yhä enemmän, ja siirtoa rajoittavat pullonkaulat tullevat vähenemään. Tasavirtayhteyksien käyttö suurvoimansiirrossa lisääntyy etenkin pitkillä etäisyyksillä suurjännitetasasuuntaajien ja vaihtosuuntaajien hintojen aletessa. Tällöin suurvoimansiirron häviöt pienenevät, ja verkon stabiilisuusongelmat vähenevät verrattuna vaihtosähköverkkoihin. Tasavirtayhteyksiä rakennetaan muuallekin kuin merikaapeleihin. Sähköverkkojen älykkyys tulee merkittävästi lisääntymään siten, että vaihtelevaa sähköntuotantoa voidaan kompensoida joustavalla kuluksella ja energian varastoinnilla.



Kuva 2.10. Visio tulevaisuuden sähköverkosta, jossa Eurooppa on yhdistetty mm. Afrikassa tapahtuvaan aurinkosähkön tuotantoon (Trieb & Müller-Steinhagen 2007).

2.5 Pitkän aikavälin skenaariot

Pitkän ajan kuluessa tarkasteltuna maailma voi ohjautua hyvin erilaisille kehityspoluille. Keskeisiä kehitykseen vaikuttavia tekijöitä ovat väestön kasvu ja väestön rakenteessa tapahtuvat muutokset, teknologian kehittyminen, asioiden hoitotavat julkishallinnossa ja yrityksissä (governance) sekä talouden kehitys. Teknologian kehittyminen voi pitkän ajan kuluessa tarjota hyvin suuria mahdollisuuksia, joita on vaikea arvioida etukäteen ja joilla voi olla mullistava merkitys energian tuotantoon ja käyttöön. Tällaisia voivat olla esimerkiksi informaatio-, nano- tai geeniteknologian tulevaisuudessa käytettävät sovellukset.

Pitkän ajan skenaarioissa voidaan lähtökohtana käyttää kuvauksia erilaisista periaatteesta mahdollisista maailmoista, ns. tarinoita (storylines). Tällaista lähestymistapaa on käytetty mm. IPCC:n päästöskenaarioreportissa (IPCC 2000) maailmanlaajuisella tasolla. Maailmojen kehitykset voivat erota toisistaan esimerkiksi sen suhteen, miten voimakasta yhteistyö ja globalisaatio eri maiden ja maaryhmien välillä on tai miten voimakkaasti pyritään hillitsemään ympäristöongelmia.

Pohdittaessa teknologian mahdollisuuksien vaikutusta vähähiilisen Suomen muodostumiseen rajoitumme tässä karkeasti kuvaukseen, jossa maailman yhdentymisen jatkuu, ja päästöjen hillintä nousee keskeiseksi ohjaavaksi tekijäksi.

Suomi on tässä kehityskulussa osa lähivuosina mitä ilmeisimmin yhä enemmän homogenisoituvaa EU:ta. Voidaan ajatella, että EU:n päästötavoite sovitaan ilmastoneuvotte- luissa ensin muiden maailman suurten valtioiden tai alueiden kanssa ja sitten toisessa vaiheessa EU:n ja Suomen kanssa. Voihan myös käydä niin, että esimerkiksi vuosisa- tamme loppupuolella Suomen maantieteellisestä alueesta ei käytetä Euroopan hallinnossa nimeä Suomi vaan Suomi kuuluu ”Koillis-Euroopan departementtiin”. Jo aivan lähiai- koina EU ottanee päästökauppasektorit nykyistä läheisempään hallinnointiinsa, samoin vähitellen myös muilla sektoreilla tarvitaan harmonisointia (esim. liikenne). EU:n har- joittama ohjaus siis kasvaa. Taloudellisessa toiminnassa Suomi olisi yhä kiinteämpi osa EU:ta.

Toisaalta on myös ehkä odotettavissa, että globalisaatio syvenee. Tieto, pääoma ja tek- nologia sekä raaka-aineet, puolivalmisteet ja valmiit tuotteet liikkuvat yhä helpommin maiden ja mantereiden välillä. Seurauksena on mahdollisesti myös kehitysmaiden voi- makas vaurastuminen, niiden kulutusmarkkinoiden kasvu ja kaikkien maiden hyötymi- nen, vaikka samalla tapahtuu myös rakenteellisia muutoksia, jotka ovat nyt vauraille maille osaksi haitallisia. Euroopan unioni ja sen mukana Suomi ovat osa tätä kehitystä.

Tulevaisuudessa Suomi ei siis ilmeisesti yritysten taloudellisena toimintaympäristönä kovin paljoa poikkea EU:sta eikä ehkä kovinkaan paljoa maailman kehityksen trendeistä. Luonteenomaisena Suomelle säilyy pohjoinen sijainti, viileähkö, joskin lämpenevä il- masto, ja mitä luultavimmin suuret metsävarat.

Voimme arvioida, että talouden laajuus Suomessa tulee kasvamaan. Voimme tehdä myös arvioita talouden taustalla olevista tekijöistä. Suomen väkiluku todennäköisesti nousee jonkin verran vuoteen 2050 mennessä mm. maahanmuuton vuoksi, osa ravinnosta ostetaan ulkomailta, rakennustilavuus kasvaa, ja liikkumisen tarve on mahdollisesti suuri samoin kuin muu kulutus.

Tämän tutkimuksen varsinainen skenaarioiden laadinta kuvataan toisessa raportissa. Tavoitteena näissä skenaarioissa on täyttää tiettyä kysyntää vastaavat palvelut, erityisesti energiapalvelut, tiukan päästörajoitustavoitteen alaisena. Tehtävä suoritetaan käyttäen hyväksi TIMES-mallia, joka valitsee ratkaisun teknologiat niin, että kokonaiskustan- nukset minimoituvat.

2.6 Muutoksen rajoitteita, hitaus ja kustannukset

Yhteiskunnan muuttumisen nopeutta vähähiilisemmäksi hillitsee investointien uusiutu- misen hitaus. Rakennusten käyttöikä on luokkaa 50–100 vuotta, joskin peruskorjaus voidaan suorittaa tyyppillisesti 20–30 vuoden välein. Kaupunkirakenne ja liikenteen inf-

rastruktuuri ovat samoin hyvin pysyviä. Voimalaitokset ovat käytössä 20–50 vuotta, teollisuuslaitokset tyypillisesti luokkaa 20 vuotta. Kodinkoneet vaihtuvat ehkäpä 10 vuoden välein, samoin kuin autot. Kulutuselektronikka sen sijaan kiertää nopeasti, noin 1–5 vuodessa.

Nopeakiertoiset tuotteet ehtivät vaihtua moneen kertaan ennen vuosisadan puoliväliä. Näissä tapahtuva tehokkuuden paraneminen ja energian säästö tulevat siis melko pian hyödynnetyksi. Sen sijaan pitkäikäiset investoinnit ehtivät vaihtua ehkä vain kerran tarkasteltuna aikana. Näissä tapauksissa uuden investoinnin tulisi olla siis päästöjen näkökulmasta huomattavasti vanhaa parempi, jos tavoitteena on päätyä luokkaa 60–80 prosentin päästönvähennykseen vuoteen 2050 mennessä, muuten uusi investointi vaikeuttaa päästönvähennystavoitteen saavuttamista.

Muutokset etenkin energian tuotannon ja käytön järjestelmässä tulevat olemaan suuria. Rajallisten voimavarojen takia on tärkeää kiinnittää huomiota kustannustehokkuuteen päästöjen vähentämisessä ottaen huomioon Suomessa otaksuttavasti kyseeseen tulevat energiantuotantomuodot. Esimerkiksi lisättäessä uusiutuvaa energiaa ja edistettäessä energian säästöä voidaan valita ne päästöjen rajoittamiskeinot, jotka ovat toteutettavissa pienimmillä kokonaiskustannuksilla energiayksikköä kohti. Samoin päästöjen rajoittamisessa kustannustehokkuutta voidaan arvioida kokonaiskustannuksilla päästön vähenemää kohti.

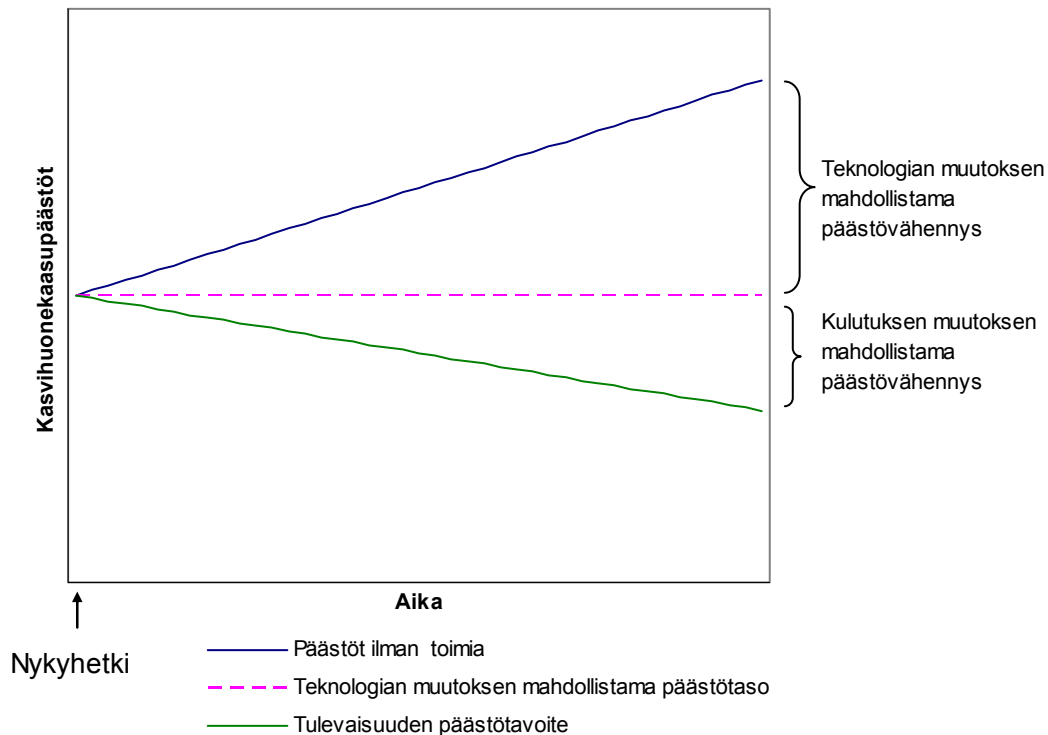
Bioenergian edistäminen vaatii erityisen monia tarkastelunäkökulmia. Metsä on myös teollisuuden raaka-aineen lähde, ja metsä sekä puusta tehdyt tuotteet voivat toimia myös ilmakehästä otetun hiilen varastona, ”nieluna”. Viljelysmaan pääkäyttömuoto on ravinnon tuotanto. Erityisesti maiden välisen kaupan kautta tulevat vaikutukset voivat olla yllättäviä.

Maailmanlaajuisesti ja myös Suomen mittakaavassa arvioituna maa- ja metsätalouteen käytettävän maapinta-alan määrä on rajoitettu. Tällöin maankäytön tehokkuutta kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisessä voidaan arvioida myös näkökulmasta, kuinka paljon päästöjä voidaan vähentää tiettyä biomassan tuotantoon varattua hehtaaria kohti kullakin tekniikalla, jolla korvataan fossiilista polttoainetta.

Toimenpiteiden valinnassa on hyvä tarkastella laajaa joukkoa eri energianlähteitä ja hyödyntämistapoja sekä tekniikoita ja lisäksi ottaa huomioon edellä mainittujen tehokkuuslukujen lisäksi myös muut vaikutukset, kuten muiden ilmansaasteiden päästöt ja energiavarmuuden paraneminen.

Teknologioiden kehitys ja ominaisuudet huomioon ottaen voidaan rakentaa takaperin tulevaisuuden päästötavoitteesta kehityspolkuja nykyhetkeen (kuva 2.11). Kuvassa on

jaoteltu päästönvähennys teknologian ja kulutuksen muutoksen osuuteen, vaikka käytännössä voi olla vaikea tehdä rajanvetoa. Tämän raportin muissa luvuissa rajoitutaan lähinnä teknologian mahdollisuuksiin rajoittaa päästöjä.



Kuva 2.11. Periaatteellinen kuva teknologian ja kulutuksen muutoksen osuudesta kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisessä. Usein myös kuluttajan tai käyttäjän toimintatapojen muutos kytkeytyy teknologian kehitykseen, jolloin teknologian ja kulutuksen osuuden selvää rajaa ei ole.

2.7 Teknologioiden tulo markkinoille ja käyttöönotto

Eri teknologioilla voidaan usein vähentää päästöjä teoreettisesti paljon. Tätä teknologista potentiaalia voidaan lisätä tutkimuksen ja kehityksen avulla. Kuitenkin käytännössä teknologioiden vaikutusmahdollisuuksista, teknologisesta potentiaalista, toteutuu taloudellisista ja osaamiseen liittyvistä syistä vain osa. Uudet teknologiat tunkeutuvat usein hitaasti markkinoille ja saavat huomattavan osuuden kokonaiskapasiteetista vasta pitkä ajan kuluttua.

Teknologioiden käyttöön saatavissa olevaa määrää kuvaa markkinapotentiaali. Teknologian hioutuessa käytössä tehokkaammaksi, edullisemmaksi ja taloudelliseen toimintaympäristöön sopivammaksi tämä potentiaali kasvaa vähitellen. Potentiaalia voidaan niin haluttaessa lisätä esimerkiksi taloudellisilla ohjaukeinoilla, kuten investointituella,

päästöveroilla, verohuojennuksilla tai päästökaupalla. Poistamalla markkinoiden vääristymiä ja lisäämällä teknologian ja rahoituksen liikkuvuutta potentiaalia voidaan nostaa kohti niin sanottua taloudellista potentiaalia. Teknologian kehittämisen lisäksi myös teknologian kysyntää tulee edistää. Kysynnän suunnalta markkinoilta tulevat ohjaussignaalit ovat ratkaisevan tärkeitä yritysten tutkimus- ja kehitystoiminnan suuntauksen kannalta. Julkiset hankinnat ovatkin olleet eräiden innovaatioiden kaupallistumisen alkutaipaleella hyvin tärkeitä. Markkinoita voidaan edistää myös uusilla liiketoimintatavoilla luomalla esimerkiksi uusia palvelukonsepteja. Teknologioiden kustannukset alenevat sitä mukaa, kun kokemuksia kertyy. Tästä käytetään usein nimitystä teknologinen oppiminen (learning).

Vaikuttamalla sosiaalisiin normeihin ja yksilöiden ja yhteisöjen toimintatapoihin voidaan lisätä teknologioiden käyttöönottoa. Yhteistoiminta- ja innovaatioverkostoilla ja toimintaohjelmilla on tärkeä tehtävä kaupallistamisessa. Teknologisen potentiaalın taso kuvaa teknologian mahdollisuuksia kaikkiaan. Tätä voidaan lisätä panostamalla tutkimukseen ja kehitykseen. Erilaisten esteiden poistaminen on keskeistä pyrittäessä lisäämään uuden teknologian käyttöä.

2.8 Yhteenveto teknologian mahdollisuuksista

Kasvihuonekaasujen päästöjä voidaan vähentää teknisesti useilla tavoilla. Pitkän ajan kuluessa on tärkeää tehostaa energiankäyttöä eri kulutussektoreilla. Tehokkuutta voidaan lisätä uusilla teknisillä konsepteilla ja järjestelmillä, joihin kuuluvat uudet käyttötavat. Huomattava osa päästöjen vähentämisen potentiaalista, noin puolet, on energian tuotannon, jakelun ja ennen kaikkea loppukäytön tehostamisessa.

Energiantuotannossa voidaan parantaa tehokkuutta ja samalla pienentää polttoaineiden käyttöä muun muassa nostamalla sähköntuotannon hyötysuhdetta tai myös lisäämällä lämmön ja sähkön yhteistuotantoa. Suomessa yhteistuotanto on yleistä sekä teollisuudessa että yhdyskuntien energiahuollossa. Muualla maailmassa, kuten useissa Keski-Euroopan maissa ja Pohjois-Amerikassa, yhteistuotantoa voidaan laajentaa vielä paljon.

Hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää korvaamalla fossiilisia energialähteitä ydinvoimalla ja uusiutuvalla energialla, kuten puuperäisellä energialla, tuulella, auringolla ja jätteillä. Päästöt vähenevät myös siirtymällä vähähiilisempiin polttoaineisiin, esimerkiksi hiilestä ja öljystä maakaasuun. Vesivoimasta on suhteellisen vähän apua päästönvähennyksissä, sillä suurin osa siitä on otettu jo käyttöön teollistuneissa maissa, etenkin Euroopassa.

Hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää myös erottamalla hiilidioksidia energia- tai teollisuuslaitoksen savukaasuista (Carbon Capture and Storage, CCS). Erotettu hiilidioksidi voidaan pumpata esimerkiksi käytettyihin maakaasu- tai öljykenttiin tai merenpohjan alla oleviin pohjavesimuodostelmiin. Hiilidioksidin erottamiseksi on useita teknisiä ratkaisuja, mutta ne kuluttavat paljon energiaa ja ovat toistaiseksi kalliita.

Erilaisia ja monesti hiilidioksidia voimakkaampia kasvihuonekaasuja vapautuu muualtakinkin kuin teollisuudesta ja energiantuotannosta. Näitä ovat muun muassa typpihapon valmistuksesta peräisin oleva dityppioksidi (N_2O) sekä fluorihilivedyt (HCF:t), perfluorihilivedyt (PFC:t) ja rikkiheksafluoridi (SF_6). Näiden fluorattujen kaasujen lähteitä ovat muun muassa kylmälaitteet, eristevaahdot, aerosolit, alumiinin valmistus ja liuottimet.

Metaania vapautuu muun muassa kaatopaikoilta. Metaanipäästöjä voidaan vähentää ensisijaisesti estämällä jätteiden syntyä ja lisäämällä kierrätystä. Metaania voidaan vähentää myös muuttamalla jätehuoltojärjestelmää ja ottamalla metaani talteen kaatopaikoilla. Hyödyntämällä metaani energiantuotantoon päästöt vähenevät osin siksi, että metaanin poltossa syntyvä hiilidioksidi on metaania harmittomampi kasvihuonekaasu. Lisäksi tuotetulla energialla voidaan korvata fossiilista alkuperää olevaa energiaa. Syntyvä hiilidioksidi on alun perin sidottu eloperäiseen ainekseen maanviljelys- tai metsäekosysteemissä ilmakehästä, jolloin tämän hiilidioksidin suhteen nettopäästö on nolla. Erilaisia jätejakeita voidaan myös käyttää joko suoraan tai tiettyyn sovelluskohteeseen prosessoituna energian lähteenä. Monet jätehuolto- ja kierrätysratkaisut ovat kustannustehokkaita keinoja vähentää kasvihuonekaasujen kokonaismäärää.

Energiahyötykäytön lisäksi runsaasti päästöjä aiheuttavien materiaalien korvaaminen vähemmän päästöjä aiheuttavilla (ns. materiaalisubstituutio) ja hyötykäyttökettujen kehittäminen ovat vähemmän tutkittuja keinoja tuotanto- ja kulutusjärjestelmien päästöjen vähentämiseksi. Syviin päästörajoituksiin pääsemiseksi keskeisiä ovat tuotteet ja palvelut, joiden energiaintensiteetti on alhainen.

Kokonaispäästöjä voidaan myös pienentää sitomalla ilmakehän hiilidioksidia varastoon ns. nieluihin. Tavallisesti tällöin ajatellaan metsäekosysteemiä mukaan lukien sekä puusto että maaperä, joissa olevaa hiilivarastoa lisätään. Myös puusta tehtyjen tuotteiden voidaan nähdä muodostavan hiilivaraston, jota voidaan pyrkiä lisäämään.

Maataloudessa syntyy merkittäviä metaani- ja dityppioksidipäästöjä muun muassa eläinten ruoansulatuksesta ja peltojen lannoittamisesta. Näiden päästöjen rajoittamisen kustannukset vaihtelevat ja riippuvat tuotantotavoista sekä näitä ohjaavista tuista. Tässä raportissa ei tätä aihepiiriä käsitellä.

Teknologiaa tarvitaan Suomen päästöjen rajoittamiseen. Varsinainen motivaatio teknologioiden kehittäjille on kuitenkin maailmanlaajuinen teknologioiden kysynnän kehitys, kun rajoitetaan kasvihuonekaasupäästöjä.

EU:n esittämät tiukat päästörajoituksen tavoitteet merkitsevät sitä, että päästöjä on rajoitettava käytännössä kaikilla sektoreilla. Energian tuotannon ja käytön järjestelmä tulee uudistaa kokonaan vanhan järjestelmän ikääntyessä ja jopa nopeamminkin, jotta voidaan päästä syviin päästörajoituksiin vuoteen 2050 mennessä.

Ohjauskeinoja tarvitaan monenlaisia, jotta toimijoilla olisi kannusteet kehittää tehokasta ja vähäpäästöistä teknologiaa ja ottaa sitä käyttöön. Ilmastonmuutoksen hillitseminen on osa kestävästä kehityksestä. Useilla toimilla, kuten uusiutuvien energianlähteiden lisäämisellä ja energiatehokkuuden parantamisella, on synergiaa kestävästä kehityksestä edistämisen kanssa. Päästöjen rajoittamista ohjataan tehokkaasti kytkemällä toimenpiteet muuhun yhteiskunnan kehittämiseen, kuten liikennepolitiikkaan, kaavoitukseen sekä yleisempään elinkeinotoiminnan edistämiseen. Uuden teknologian kehittäminen ja valmistaminen maailman laajuisille kasvaville markkinoille voi myös muodostua uudeksi merkittäväksi vaurauden lähteeksi Suomelle.

Lähdeviitteet ja lisätietoja

Bali AWG 2007. Conclusions adopted by the Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol at its resumed fourth session held in Bali, 3–11 December 2007. Review of work programme, methods of work and schedule of future sessions.

EC 2007. Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius, The way ahead for 2020 and beyond, Impact Assessment. Commission of the European Communities. http://europa.eu/press_room/presspacks/energy/comm2007_02_en.pdf.

IEA 2006. Energy Technology Perspectives 2006. Scenarios & Strategies to 2050. IEA, Paris, France.

IPCC 2000. Special Report on Emission Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom.

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

Kirkinen, J., Martikainen, A., Holttinen, H., Savolainen, I., Auvinen, O. & Syri, S. 2005. Impacts on the Energy Sector and Adaptation of the Electricity Network Business under a Changing Climate in Finland. Finnish Environment Institute Mimeographs 340, Helsinki. 41 s. ISBN 952-11-2116-5.

Koljonen, T., Lehtilä, A., Savolainen, I., Peltola, E., Flyktman, M., Pohjola, J., Liski, M. Ahonen, H.-M. & Laine, A, 2008. Suomalaisen energiateknologian globaali kysyntä ilmastopoliittikan muuttuessa. Julkaistaan VTT Tiedotteita -sarjassa.

Martikainen, A., Pykälä M.-L. & Farin J. 2007. Recognizing climate change in electricity network design and construction. VTT Research Notes 2419, Espoo. 106 p. + app. 80 p. ISBN ISBN 978-951-38-6977-9. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2419.pdf>.

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

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

Savolainen, I., Ohlström, M. & Kärkkäinen, A. (toim.) 2003. Ilmasto – Haaste teknologialle. Tekes, Helsinki, 2003.

Syri, S., Lehtilä, A., Ekholm, T., Savolainen, I., Holttinen, H. & Peltola, E. 2008. Global energy and emissions scenarios for effective climate change mitigation – deterministic and stochastic scenarios with the TIAM model. *International Journal of greenhouse Gas Control* 2 (2008): 274–285.

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

Tilastokeskus 2007a. Tilastot aiheittain, ympäristö ja luonnonvarat, kasvihuonekaasut. <http://www.stat.fi/til/khki/index.html>.

Tilastokeskus 2007b. Tilastot aiheittain, energia. <http://www.stat.fi/til/ene.html>.

Trieb, F. & Müller-Steinhagen, H. 2007. Europe – Middle East – North Africa cooperation for sustainable electricity and water. *Sustain Sci* (2007) 2:205–219.

WEC 2004. Comparison of energy systems using life cycle assessment – Special report. World Energy Council. July. London.

3. Energiantuotantoteknologiat ja tehostamismahdollisuudet

3.1 Bioenergian käytön lisäämisen teknologiset haasteet

Bioenergian käyttö on Suomessa lähes kaksinkertaistunut noin 15 vuodessa. Pääosin kasvu on tapahtunut metsäteollisuuden tuotannon kasvun myötä, mutta läheskään kaikki energian tuotantoon soveltuvat biomassavarat eivät ole vielä käytössä. Käytön lisäämisen esteenä on ollut huono kannattavuus fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna, koska sekä tarvittavien investointien kustannukset että polttoaineen hinta ovat olleet fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna korkeita.

Suomalaisen bioenergian käytön ominaispiirteisiin kuuluu, että valtaosa bioenergiasta tuotetaan suurissa yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon (CHP) laitoksissa teollisuudessa ja yhdyskunnissa, joissa on korkea kokonaishyötysuhde ja rakennusaste (tuotetun sähkön suhde tuotettuun kaukolämpöön tai prosessihöyryyn). Laitokset on suunniteltu monipolttoainekäyttöön, joten niissä voidaan käyttää kulloinkin saatavilla olevaa edullisinta polttoaineyhdistelmää. Näissä laitoksissa turve on useimmiten kaukolämmön tuotannossa pääpolttoaine ja metsäteollisuudessa kuori ja muut tuotannon tähteet. Turpeen tai hiilen käyttö on mahdollistanut polttoaineen saatavuuden suurillekin laitoksille, korkean rakennusasteen ja hyvän käytettävyyden myös hankalammin poltettaville biomassoille.

Teknologisina haasteina ovat ratkaisut, jotka mahdollistavat kustannustehokkaasti

- polttoaineiden saatavuuden lisäämisen eri polttoaineketjuilla
- sähkön tuotannon entistä pienemmillä lämpökuormilla
- rakennusasteen nostamisen
- monipolttoainekäytön laajentamisen, mm. peltoenergiaan ja jätteisiin
- rakennusten lämmityksen bioenergialla
- liikenteen biopolttoaineiden ja muiden polttoainejalosteiden valmistuksen ja
- muiden kuin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen.

3.2 Biopolttoaineketjut

3.2.1 Metsähake

Metsäenergian hankinta kuusivaltaisilta päätehakkuilta on kustannustehokkain tapa metsähakkeen tuotantoon. Latvukset tuodaan tienvarteen joko irtorisuna tai paalattuina, ja haketus tai murskaus tehdään joko tienvarressa, välivarastoilla tai laitoksilla. Suurimmat laitokset ovat hankkineet sähkökäyttöisiä käyttöpaikkamurskaimia, jotka soveltuvat

useille biopolttoaineille. Viime vuosina yleistynyt kantojen nosto noin kaksinkertaistaa hakkuupinta-alalta saatavan bioenergiamäärän. Kantojen nosto on helpottanut koneellisen istutuksen käyttöönottoa, ja metsänomistajille voidaan tarjota kokonaispalvelupaketteja, joita tulevaisuudessa on mahdollisuus laajentaa esimerkiksi tuhkalannoituksiin ja koneellistettuun taimikonhoitoon. Nuorista metsistä korjataan joko ainoastaan energiapuuta tai sekä kuitu- että energiapuuta, mikä vaikuttaa valittavaan korjuumenetelmään.

Kehitystyö kohdistuu korjuuketjujen tuottavuuden nostoon, uusiin kohteisiin ja ympäri-voitukseen käyttöön sopivien ketjujen (nuoret metsät, suometsät, männyn ja koivun kannot, kannot harvennuksilta) kehittämiseen ja logistiikkajärjestelyjen kehittämiseen, jotta sekä kustannukset laskisivat että raaka-ainepohja kasvaisi. Myös uusilla metsänhoitokäytännöillä voidaan lisätä energiapuun saantoa harvennuksista, ja puuston kasvun edistäminen lannoituksella lisää merkittävästi myös energiapuun määrää. Energiametsiä ei ole perustettu pieniä koealoja lukuun ottamatta, joskin jonkin verran epäonnistuneita leimikoita on korjattu kokonaan energiapuuksi. Ruotsissa on arvioitu, että metsänkasvua olisi mahdollista lisätä metsänhoidollisilla toimenpiteillä seuraavina vuosikymmeninä jopa 30 % vuodessa nykytilaan verrattuna. Pitkäkestoinen kokeellinen tutkimustyö metsäenergian hyödyntämisestä ja mahdollisen tuhkanpalautuksen ympäristövaikutuksesta on käynnissä, jotta lisääntynyt biomassan poisvienti metsistä ei aiheuttaisi kasvun vähenemää tai päästöjä vesistöihin.

Kansallisessa metsäohjelmassa 2015 (MMM 2008) metsähakkeen vuotuiseksi käytöksi 2015 on arvioitu 8–12 milj. k-m³. Metsäenergian hankinnan tekniseksi maksimipotentiaaliksi on Metla arvioinut 110 PJ/a vuoteen 2020 mennessä, ja samalla voitaisiin ainespuun hakkuita kasvattaa. Käytännön rajoitteiden, kuten pitkien kuljetusmatkojen, pienten hakkuualojen ja maanomistajien halukkuuden, voidaan arvioida rajoittavan mahdollisuuksia 70 PJ:een vuodessa. Tavoitteen asettaminen 110 PJ:een vuoteen 2050 on perusteltua. Tuotannon lisäämistä vaikeuttavaksi tekijäksi on arvioitu koulutetun työvoiman niukkuutta, mutta toisaalta energiapuun korjuulla voidaan tasoittaa teollisuuden puun hankinnan kausivaihteluita.

Jos energiasektorin puustamaksukyky nousee korkeammaksi kuin metsäteollisuuden raaka-aineesta maksukyky, on mahdollista, että kuitupuuta käytetään energian tuotantoon, ensiksi kuljetusmatkojen ollessa pitkiä sellutehtaalle. Tällaiseen tilanteeseen on tultu esimerkiksi eräillä Saksan ja Ruotsin alueilla. Suomessa koivukuitupuuta käytetään jonkin verran pilkkeiden tekoon. Metsäteollisuuden tuotteiden jalostusarvo on energiatuotteita selvästi korkeampi, joten kansantalouden kannalta puun raaka-ainekäyttö on parempi vaihtoehto.

3.2.2 Peltoenergia

Peltoenergian osalta ollaan vasta kehitystyön alussa. Suomessa polttoon sopivan monivuotisen energiakasvin valinta päätyi ruokohelpeen, ja sen vaihtoehtoisista korjuuketuista on kymmenen vuoden kokemus. Ruokohelppi monivuotisena ja keväällä korjattavana heinäkasvina tarvitsee vähän lannoitusta ja työpanosta, peltoala on mahdollista palauttaa nopeasti takaisin ruoan tuotantoon. Kehittämistarvetta on lajikejalostuksessa, nykyisten 30 %:n suuruisen korjuutappioiden vähentämisessä sekä paaleina tai irtosilppuna laitoksille tulevan helven laitoskäsittelyssä laitoksissa, joita ei ole suunniteltu helven käyttöön. Myös muita yksi- ja monivuotisia energiakasveja on viljelykokeissa, ja uusia energiakasveja tulee viljelyyn lähivuosina, ja toisaalta ruokohelven tai muiden energiakasvien käyttöä kuituraaka-aineena tullaan tutkimaan. Vuonna 2020 maksimissaan 150 000 hehtaarin viljelyalalla tuotetun ruokohelven energiasisältö on 16 PJ, kun hehtaartuotto on saatu nostettua tasolle 110 GJ/ha/a.

Biokaasun tuotannon yleistyessä tulee peltokasvien käyttö energian tuotantoon lisääntymään täydentävänä raaka-aineena, esimerkkeinä on mainittu kasvien naatit, nurmien toinen tuorerehusato ja apila. Jos viljaa käytetään bioetanolin tuotantoon tai öljykasveja biodieselin tuotantoon, tällä on vaikutuksia lajikevalintoihin ja viljelykäytäntöihin viljan laatuvaatimusten muuttuessa ruoan tai rehun tuotantoon verrattuna.

Oljen energiakäyttö on hyvin pientä, mutta olkea olisi mahdollista kerätä keskimäärin noin 3,6 PJ vuodessa 100 000 hehtaarilta. Käyttö edellyttää investointeja käsittelylaitteistoihin laitoksilla, ja käyttökokemuksien kokoamista erityyppisiin kattiloihin soveltuvista polttoaineiden seossuhteista. Suuret käyttömäärät edellyttävät oljelle suunniteltuja energian tuotantolaitoksia.

Kokonaisuudessaan energiakäyttöön voisi Suomen hieman yli 2 milj. hehtaarin peltoalasta tulla käyttöön jopa puoli miljoonaa hehtaaria ilman että ruokahuolto vaarantetaisiin.

3.2.3 Kierrätyspolttoaineet

Suomessa viedään kaatopaikalle vielä suuria määriä orgaanisia jätteitä, joita ei ole mahdollista kierrättää raaka-aineena, mutta jotka soveltuvat energiakäyttöön. Tarkka syntypistelajittelu mahdollistaa kustannusten säästön energian tuotannossa, mutta toisaalta jätemäärien pienuus voi johtaa epätaloudellisiin laitostekoihin. Laadultaan parhaita jättejakeita poltetaan lisääntyvässä määrin teollisuuden ja yhdyskuntien jätteen seoskäyttöön luvitetuissa CHP-laitoksissa, joissa sähkön tuotannon osuus saadaan suureksi. Suomeen rakennettaneen muutama huonompilaatuisen yhdyskuntajätteen polttoon

soveltuva jätteenpolttolaitos lämmön tuotantoon tai CHP-tuotantoon, joissa rakennusaste jää kuitenkin pieneksi. Biojätteistä osa kompostoidaan, ja mädätys, poltto ja terminen kaasutus ovat vaihtoehtoisia energian tuotantovaihtoehtoja. Jätteiden energiakäyttö voi kasvaa noin 15 PJ:een vuonna 2020.

3.2.4 Uudet biomassat

Maailmanlaajuisesti on käynnissä paljon tutkimustyötä uusien biomassojen, kuten levien ja bakteerien, kehittämiseksi. Osa biomassoista sopisi bioöljyn raaka-aineeksi, ja eräät tuottavat suoraan vetyä vaikkapa polttokennoille. Eräissä konsepteissa hyödynnetään energian tuotannon tai teollisuusprosessien savukaasujen lämpöä ja ravinteita biomassan kasvuun. Vuoteen 2050 mennessä arvioidaan ensimmäisten biomassan tuotantoon käytettävien pienimittaisten demonstraatiolaitosten olevan käytössä Suomessa teollisuuslaitosten yhteydessä.

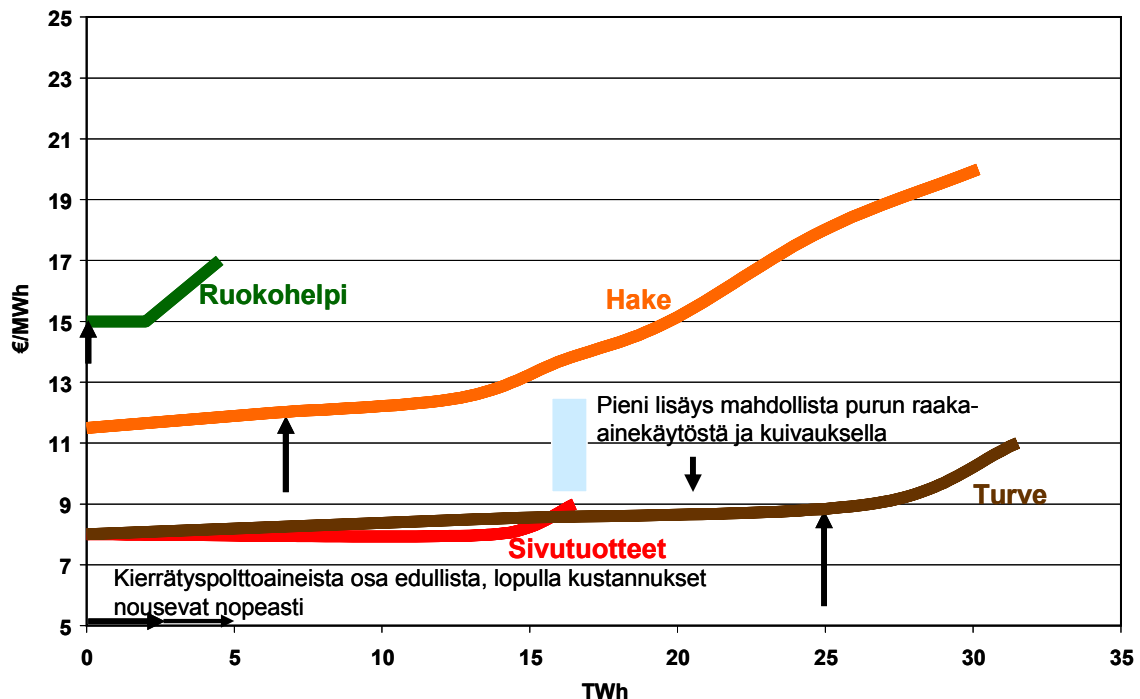
3.2.5 Metsäteollisuuden sivutuotteet

Metsäteollisuuden sivutuotteiden ja tähteiden, kuten mustalipeän, kuoren, purun ja liet-
teiden, saatavuus riippuu metsäteollisuuden tuotannon määrästä ja käytettävistä tuotantoprosesseista. Energiakäytölle vaihtoehtoisia käyttökohteita on monia, esimerkiksi sa-
hauksesta saatava puru sopii selluloosan tai levyjen tuotantoon. Pienempiä sivutuottei-
den käyttösektoreita ovat jätehuolto, puutarhat ja maatalous. Kehitteillä on lukuisia uu-
sia prosesseja biomateriaalien valmistukseen esimerkiksi kuoresta, ja mahdolliset käyt-
tökohteet ovat fossiilisten raaka-aineiden korvaaminen niin paperin kuin muovin val-
mistuksessa ja raaka-aineita jopa elintarvike- ja lääketeollisuuteen. Vuoteen 2020 men-
nessä niiden ei arvioida vähentävän merkittävästi energiasektorille tulevien puuperäisten
materiaalien määrää. Vuoteen 2050 mennessä arvioidaan metsäteollisuuden yhteydessä
toimivan useita erityyppisiä biojalostamoja, joten kiinteiden sivutuotteiden käyttö ener-
gian ja energiajalosteiden tuotantoon arvioidaan vähentyvän 10–20 %.

Kemiallisen selluloosan tuotanto ja vientikuivan sahatavaran tuotanto on energiayli-
omavaraista, eli tuotannon tarvitsema energiamäärä on pienempi kuin tuotannosta tule-
vien sivutuotteiden energiasisältö. Kokonaisuudessaan metsäteollisuus ei ole kuitenkaan
energiaomavarainen. Bioenergian osuus Suomen kokonaiskulutuksesta vähenee, jos
metsäteollisuudessa puun käyttöä Suomessa korvataan tuontiselluloosalla muun tuotan-
non pisyessä ennallaan.

3.2.6 Yhteenveto polttoaineiden saatavuudesta ja kustannustasosta

Biopolttoaineiden saatavuus vuoteen 2020 mennessä on esitetty seuraavassa kuvassa (kuva 3.1) kustannusten funktiona. Lähteenä on käytetty viime vuosina tehtyjä arvioita, jotka on yhdistetty. Kustannustasona on vuosi 2005, joten esimerkiksi elinkustannusten ja etenkin fossiilisten polttoaineiden hinnan nousu on otettava huomioon tulevaisuuden hintatasoissa.



Kuva 3.1. Arvio biopolttoaineiden saatavuudesta vuonna 2020 kustannusten funktiona vuoden 2005 kustannustasolla. Nykyinen käyttö polttoaineittain on merkitty nuolella.

Metsäteollisuuden sivutuotteiden määrän on arvioitu vähentyvän vuoteen 2020 mennessä nykytasoltaan sahauksen vähentymisen takia. Ruokohelven hinnassa on otettu huomioon maataloustuet, joiden arvioidaan vähenevän tulevaisuudessa, mutta toisaalta tuotannon tehokkuuden arvioidaan kompensoivan näiden vähentymistä.

Biopolttoaineiden vienti hakkeena, pelletteinä tai liikenteen biopolttoaineena voi vähentää merkittävästi Suomessa tarjolla olevaa määrää. Kehitys on mahdollinen, jos muissa maissa biopolttoaineista maksukyky on huomattavasti Suomea korkeampi. Muualla markkinoiden laajuus voi olla moninkertainen Suomen polttoainevaroihin verrattuna. Polttoaineen hankintasopimuksia tehdään pitkiksi ajoiksi, joten jos vienti alkaa, sitä tulee olemaan vaikea kääntää takaisin. Viime vuosina kauppa on ollut pelletin vientiä, määrältään muutama PJ vuodessa.

3.3 Polttoon perustuvat sähkön ja lämmön tuotannon teknologiat

3.3.1 Biopolttoaineiden käsittelytekniikat

Kiinteiden biomassojen käytön kustannustehokkuutta heikentävät etenkin kosteuden aiheuttama alhainen energiatiheys, biomassojen heikko varastoitavuus ja käsittelyn työturvallisuus- ja työterveysvaatimusten huomioonottaminen. Näistä aiheutuu merkittäviä logistiikka- ja muita käsittelykustannuksia. Kustannuksia pyritään pienentämään hyödyntämällä aurinkoenergiaa tai käyttämällä keinokuivausmenetelmiä ja nostamalla energiatiheyttä tiivistämistekniikoilla, kuten pellettien ja bioöljyjen valmistuksella. Jos aurinkoenergialla tai jätelämmöillä voidaan vähentää biopolttoaineen kosteus 50 %:sta 40 %:iin, saadaan lisättyä viitisen prosenttia polttoainetuotteen sisältämää hyötyenergiaa.

Kuivurit mahdollistavat lisäksi usein kattilan tehon noston huippukuormituksen aikana, jos rajoittavana tekijänä on ollut polttoaineen kosteuteen liittyvät tekijät. Kuivureita on rakennettu muutamia metsäteollisuuden laitoksille, ja niitä tullaan rakentamaan lisää. Kuivausmenetelmistä etenkin viirakuivaus on yleistymässä. Kuivaus on myös olennainen osa polttoainejalosteiden valmistusta. Polttoaine kuivataan tyypillisesti 10–20 %:n kosteuteen pellettien, pyrolyysiöljyn tai termiseen kaasutukseen perustuvan synteettisen biodieselin valmistusta varten. Kuivaus voidaan integroida prosessien jätelämpöjen käyttöön ja CHP-tuotannossa osaksi lämpökuormaa. Toinen vaihtoehto on lämmön talteenotto savukaasuista, mutta tällöin CHP-laitoksilla voidaan menettää lämpökuorman pienenemisen takia sähkön tuotantoa.

3.3.2 Biomassan pienkäyttö

Puun rakennuskohtaisen käytön lisäämisen suurimpana esteenä on ollut puulämmityksen työläys. Automaatiota voidaan hyödyntää ja työn tarvetta voidaan vähentää käytettäessä haketta tai pellettejä, joita varten on kehitetty uusia varastointi-, käsittely- ja kattilatekniikoita. Automatisoinnin myötä on mahdollistunut päästöjen vähentäminen murtoosaan. Vaihtoehtona on puhtaiden bioöljyjen tai bioseoksien käyttöön siirtyminen nykyisissä öljykattiloissa, joihin tarvittavat muutostyöt riippuvat bioöljyn laadusta.

Pilkkeiden käyttö lisääntyy kotitalouksissa tulevaisuudessa. Se sopii huippukuormituksen leikkaamiseen etenkin sähkölämmitystaloissa. Lisäksi sillä on merkitystä viihtyvyyssikäytössä (takat, saunat). Varaavien tulisijojen hiukkas- ja hiilivety päästöjä on pienennetty ja hyötysuhdetta parannettu. Savukaasujen puhdistus ja lauhdutus pienessä kokoluokassa tulee kaupallistumaan eräissä maissa kireiden päästö- ja hyötysuhdevaatimusten takia.

3.3.3 Lämpökeskukset

Yhdyskuntien ja teollisuuden lämpökeskusten kehitystyön kohteena on hankalasti poltettaville biomassoille soveltuvat kattilat: esimerkkeinä peltobiomassat, lanta ja muu eläinjäte. Suurimmat parannukset hyötysuhteeseen on saatu savukaasun lauhdutuksella ja absorptiolämpöpumpun käytöllä, joista jälkimmäinen ei ole kuitenkaan yleistynyt. Savukaasujen lauhdutus ja hyötysuhteen nosto noin 100 %:iin sopii erityisesti tilanteissa, joissa kattila on jäämässä pieneksi lämpökuormaan verrattuna. Laitosten automaatio on vähentänyt käyttöhenkilöstön tarvetta huomattavasti.

Keskitetystä lämmön tuotannosta on tulevaisuudessa mahdollista yhdistää muiden uusiutuvien energialähteiden käyttöä bioenergian käyttöön. Kesäajan biokattiloille liian pienien kuormien aikana on mahdollista aurinkoenergian käyttö suoraan tai lämpöpumppujen avulla. Lämpöpumppukytkentöjä on myös mahdollista käyttää veden esilämmitykseen, jos biopolttoainekattila ei pysty tuottamaan huippukuormia.

3.3.4 Pienen kokoluokan yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto

Kiinteän polttoaineen käyttöön soveltuvat pienen kokoluokan (alle 5 MWe) CHP-laitoksia on rakennettu huonosta rakennusasteesta (0,1–0,2) johtuvan heikon kilpailukykyyn takia vähän, vaikka teknisiä ratkaisuja (arina- ja leijukattilat, höyrykoneet ja -turbiinit) on tarjolla. Demonstroitivaiheessa on kiinteäpeltikaasuttimeen ja moottoriin perustuva ratkaisu, jossa rakennusaste on yli 0,5. Kaupallistuttuaan konseptilla on Suomessa kymmeniä sopivia kohteita. Vaihtoehtoiseksi polttoaineeksi soveltuisivat monentyypiset bioöljyt, jolloin laitosinvestoinnit jäisivät kiinteän polttoaineen käyttöä huomattavasti pienemmäksi.

Biokaasun käyttöön on tarjolla valmiita kaasumoottoriin ja -turbiiniin perustuvia laitoskonsepteja ja laitetoimittajia. Polttokennojen kaupallistuminen tarjoaisi mahdollisuuden lämmön ja sähkön yhteistuotantoon jopa omakotitalokokoluokkaan.

Investointikustannusten alentamisen kannalta on kaikille tekniikoille yhteistä pyrkimys standardiratkaisuihin, pitkiin sarjoihin ja tehdasvalmistukseen räätälöityjen ratkaisujen ja paikalla rakentamisen sijasta. Markkinoiden kasvu koti- ja ulkomaille mahdollistaa tätä kehitystä tulevaisuudessa.

3.3.5 Suuren kokoluokan yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto

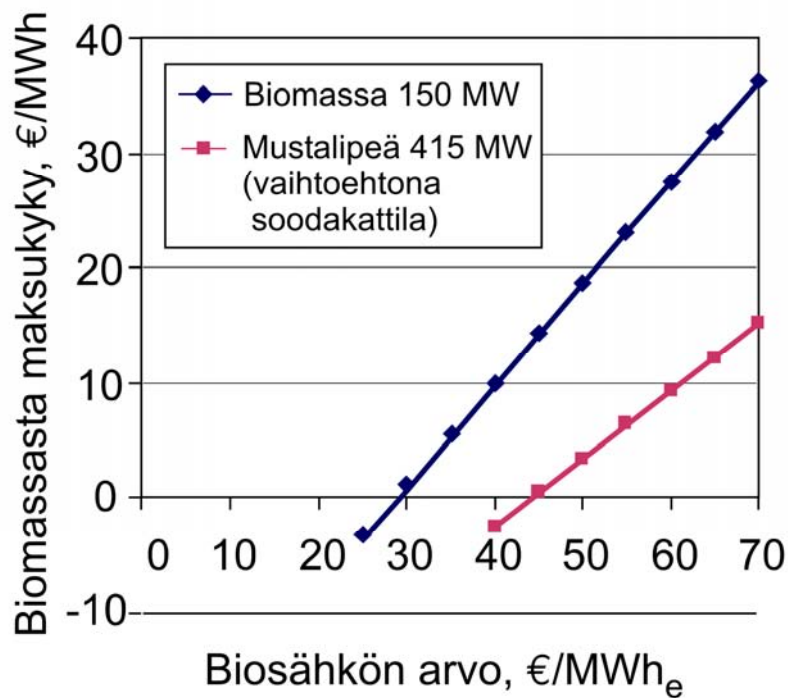
Kehitystyön kohteena on ollut laitosten polttoainevalikoiman laajentaminen höyryn arvoja ja siten rakennusastetta laskematta ja päästöjä edelleen vähentäen. Tähän voidaan päästä arina- ja leijukattiloiden sekä tulipesäkonstruktioiden ja materiaalien valinnalla ja ilman syöttöä optimoimalla. Lisäksi leijupoltossa on otettu käyttöön uusia materiaaleja leijutukseen ja tulipesään syötettäviä lisäaineita. Laitosten käytettävyyttä on parannettu aiempaa tarkemmilla mittauksilla, säädöllä, automatiikalla ja optimoinnilla. Tärkeä osa kehitystyötä on ollut laitosten päästöjen vähentäminen, etenkin typenoksidien, palamatomien ja hiukkasten osalta.

Laitoskokoa ja laitosten kannattavuutta voidaan parantaa lämpökuormaa kasvattamalla, esimerkiksi yhdistämällä pellettien tai muiden polttoainelajosteiden tuotantoa laitoksiin. Suomessa on pitkät perinteet teollisuuden ja yhdyskuntien yhteisistä laitoksista, ja integrointia on mahdollista laajentaa muihin kohteisiin, kuten kasvihuoneisiin ja jätehuoltoon.

Erityisen vaikeille polttoaineille, kuten jätejakeille ja oljelle, voidaan käyttää erilaisia laitos- ja kytkentävaihtoehtoja: kaasutusta ja syntyvän synteetikaasun polttoa, erillisiä höyryn tulistusosia tai polttoaineen käyttöä vain veden esilämmitykseen. Näillä saadaan laitoksen kokonaishyötysuhde ja rakennusaste korkeaksi.

Soodakattiloissa on mahdollisuuksia edelleen korkeampiin hyötysuhteisiin ja rakennusasteisiin. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus voidaan nostaa 85 %:iin, ilmaylimäärää vähentää, esilämmitystä lisätä ja savukaasujen poistolämpötilaa alentaa. Höyryn arvoja voidaan nostaa siirtymällä parempiin materiaaleihin ja siirtymällä erilliseen tulistukseen.

Biomassan paineistetun kaasutuksen ja polton kehityspanokset ovat olleet melko vähäisiä 1990-luvun jälkeen. Kaasutuksen kehitystyö on lähtenyt kiivaaseen käyntiin useissa maissa liikenteen biopolttoaineiden valmistamiseksi. Tulokset ovat hyödynnettävissä jatkossa myös kaasutukseen perustuvissa kaasuturbiini- ja höyrypiirin yhdistävissä IGCC-laitoksissa, joissa on mahdollista tuottaa sähköä ja lämpöä yhtä paljon, eli yltää rakennusasteessa arvoon 1. Konseptin kiinnostavuus riippuu siitä, onko maksukyky biosähköstä selvästi korkeampi kuin maksukyky lämmöstä ja onko laitospaikalla biomassaa tarjolla riittävästi myös suuren kokoluokan sähkön tuotantoon. Tarvittava biopolttoainemäärä on yli 100 MWth. Oheisessa kuvassa on esitetty, millä polttoaineen ja sähkön hinnoilla kannattaa siirtyä leiju-CHP:stä ja soodakattilasta IGCC-kytkentään.



Kuva 3.2. Biomassasta maksukyky IGCC-laitoksella ja mustalipeän kaasutuksella eri biosähkön hinnoilla.

3.3.6 Seospoltto hiilen pölypolttokattiloissa

Biopolttoaineita voidaan lisätä hiilipölypolttokattiloihin pellettejä hiilimylyissä murskaamalla kattilan tehon laskematta. Vaihtoehtona on myös partikkelikooltaan pienen biomassan, kuten sahanpurun, suora syöttö esimerkiksi pneumaattisesti. Monista maista on näistä useiden vuoden käyttökokemuksia. Suurempiin energiaosuuksiin päästään kaasuttamalla erillisessä kaasuttimessa biomassaa ja johtamalla synteesikaasu kattilaan. Tästä on 10 vuoden käyttökokemukset Lahden Kymijärven laitoksesta, jossa käytetty polttoainevalikoima on erittäin laaja.

Seospoltto tulee yleistymään Suomessakin, koska investointikustannukset ovat pienet erillisiin laitoksiin verrattuna ja koska suurissa laitoksissa päästään pieniä laitoksia oleellisesti parempiin hyötysuhteisiin ja rakennusasteisiin.

3.3.7 Uudet suuret CHP- ja lauhdelaitokset

Suuren kokoluokan leijupoltossa seuraava teknologiahyppy on siirtyminen läpivirtauskattiloihin ja ylikriittisiin höyryn arvoihin, joita parhaillaan demonstroidaan hiilellä ja tulevaisuudessa myös hiilen ja biopolttoaineiden seoskäytössä. Sähkön tuotannon hyö-

tysuhteen ja rakennusasteen nousu ovat merkittäviä nykytekniikkaan verrattuna. Laitos sopii peruskuormakäyttöön sekä sähkön tuotantoon että suuren lämpökuorman yhteyteen. Myös aiempaan esitelty IGCC-laitos on tulevaisuuden laitosvaihtoehto, etenkin, jos biomassaa on runsaasti tarjolla ja biosähkön arvo on korkea lämpöön verrattuna.

3.3.8 Kustannuskehitys

Nykyisin käytössä olevien energian tuotantoteknologioiden hyötysuhde ja yhdistetyn sähkön ja lämmön (CHP) tuotannon rakennusaste nousevat hitaasti. Teknologiahypyt, joissa siirrytään korvaavan teknologian käyttöön, mahdollistavat suurempia porrasmaisia parannuksia. Esimerkkeinä rakennusasteen porrasmaisesta parantumisesta ovat pienessä kokoluokassa höyrykattilan ja höyryturbiinin korvaaminen kaasutin-polttomoottorikytkennällä, sekä siirtyminen ylikriittisiin höyryn arvoihin ja läpivirtausleijukattiloihin ja IGCC-kytkentään suuressa kokoluokassa.

Kehitteillä olevien teknologioiden, kuten biomassan IGCC-laitosten, investointikustannukset laskevat tyypillisesti 2–4 laitoksen rakentamisen jälkeen merkittävästi, ja sen jälkeen hitaammin. Suomen markkinat ovat niin pienet, että lämmön tuotantoon käytettyjä laitteita lukuun ottamatta uusien teknologioiden kaupallistumiseen tarvittavien kehityspanosten takaisin saaminen edellyttää vientimarkkinoita. Korkearakennusasteisten laitosten kilpailukyky riippuu olennaisesti siitä, kuinka suuri tuotetun sähkön ja lämmön hintaero on ja onko biomassaa tarjolla lisääntyvää sähkön tuotantoa vastaavasti.

Viime vuosina CHP-laitosten investointikustannukset ovat nousseet selvästi materiaali-kustannusten nousun ja osaltaan myös hyvän markkinatilanteen ansiosta. Investointikustannukset ovat nousseet myös siksi, että päästövaatimukset tiukkenevat, hyötysuhteen parannukset ja polttoainevalikoiman laajentaminen hankalammin poltettaviin biomassoihin edellyttävät monimutkaisempia rakenteita ja kalliimpia materiaaleja. Polttoaineteholtan alle 200 MW:n CHP-laitosten investointikustannukset ovat vaihdelleet 700–800 euroa/kW, ja yli 200 MW:n laitosten tyypillisesti välillä 500–600 euroa/kW. Suurimpiin laitoksiin investoidaan useimmiten erillinen lauhdeosa, joka mahdollistaa täyden sähkön tuotannon myös pienillä lämpökuormilla.

Pienessä kokoluokassa standardiratkaisut, tehdasvalmistus ja myynnin volyymin kasvu laskevat kustannuksia, mutta automaation lisääminen ja päästöjen vähentäminen nostavat kustannuksia edelleen.

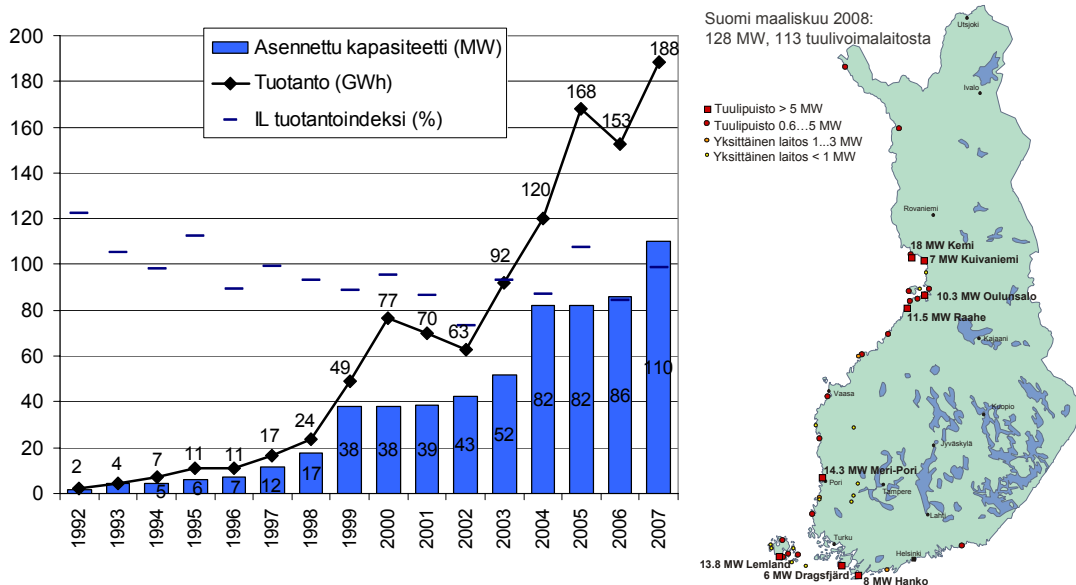
3.4 Tuulienergia

3.4.1 Nykytilanne

Tuulivoima Suomessa

Vuonna 2008 Suomessa on 113 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 128 MW (vuoden 2005 lopussa 93 tuulivoimalaa, 79 MW). Vuonna 2007 tuulivoimaloiden tuotanto oli 188 GWh, joka oli 0,2 % Suomen sähkön kokonaiskulutuksesta. Tuulivoima-tuotannon kehitys Suomessa ja tuulivoimaloiden sijainti on esitetty kuvassa 3.3.

Tuulivoiman käytön kehittyminen on vaihdellut voimakkaasti. Tuulivoimakapasiteetin kasvun osalta vuosi 2004 on ollut tähän mennessä paras: kasvua oli vuoteen 2003 ver-rattuna 30 MW (57 %) ja tuotannossa 30 GWh (31 %). Vuosina 2005–2006 ei Suo-messa rakennettu merkittävästi uutta tuulivoimakapasiteettia. Vuodesta 2004 vuoteen 2006 oli tuulivoimakapasiteetin nettolisäys 4 MW eli vain vajaat 5 prosenttia.



Kuva 3.3. Tuulivoiman kehitys Suomessa ja käytössä olevien tuulivoimaloiden sijainti (VTT 2008).

Vuosille 2008–2010 on vireillä hieman yli 100 MW julkistettuja hankkeita. Näiden lisäksi on kehitteillä ainakin muutamia vielä julkaisemattomia hankkeita. Kun ottaa huomioon, että hankkeiden toteutukseen liittyy epävarmuuksia ja toisaalta uusia hankkeita saattaa ilmaantua, on kapasiteetin lisäysmahdollisuus vuosina 2008–2010 noin 100–150 MW. Vuosina 2008–2010 lopullisesti toteutukseen päätyvien hankkeiden lukumäärä on voi-makkaasti sidoksissa uusiutuvien energialähteiden edistämiseen liittyvään tukipolitiikkaan.

Suomalaisen teknologiateollisuuden tuulivoimaan liittyvän liiketoiminnan arvo oli vuonna 2007 alustavien arvioiden mukaan hieman yli 500 milj. e. Tästä valtaosa liittyi vientiin. Viennin arvon kasvusta huolimatta suomalaisten toimijoiden osuus maailmanmarkkinoilla on pienentynyt.

Tuulivoiman rakentaminen ja tuotanto muissa maissa

Sähkön tuotannon investoinneissa tuulivoiman rooli on kasvanut viime vuosien aikana merkittäväksi. Maailman tuulivoimakapasiteetti oli vuoden 2007 lopussa noin 94 000 MW (vuoden 2006 lopussa IEA:n mukaan 74 360 MW). Vuoden 2007 aikana käyttöön otettu uusi kapasiteetti oli noin 19 000 MW (vuonna 2006 14 000 MW). Vuosina 2007–2011 arvioidaan valmistuvan noin 84 000 MW lisää tuulivoimaa. Tämä merkitsee kapasiteetin kaksinkertaistumista ja noin 100 mrd. €:n investointimarkkinaa alan teollisuudelle. Merkittävimmät markkina-alueet ovat Eurooppa, Yhdysvallat, Kanada, Kiina ja Intia (Taulukko 3.1).

Taulukko 3.1. Tuulivoiman käyttö ja käytön kehittyminen lähivuosina Suomessa, eräillä tärkeillä markkina-alueilla ja globaalisti.

Alue	Tuulivoima vuoden 2006 lopussa			Lisärakentaminen lähivuosina	
	MW	TWh	Osuus sähkön käytöstä	Lisäystavoite tai arvioitu markkinavolyymi	Markkinan arvo (jaksolla, jakso vuosia) ja kasvu (CAGR)
Suomi	86	0,15	0,2 %	100–150 MW lisäys vuoteen 2010	0,2 mrd €, 3 a 30 %/a
Ruotsi	571	0,99	0,7 %	7 TWh vuoteen 2016	3,5 mrd €, 10 a 21 %/a
Norja	325	0,67	0,6 %	3 TWh vuoteen 2010	1,5 mrd €/a, 3 a 60 %/a
Tanska	3 137	6,1	16,8 %	400 MW vuoteen 2010	0,6 mrd €, 3 a 4 %/a
EU-25	47 644	100	3 %	~10 000 MW/a vuoteen 2011	~13 mrd €/a 18 %/a
Yhdysvallat	11 575	2,5	< 1 %	350 GW (20 % sähköstä)	
Kanada	1 460	3,8	0,7 %	3 000 MW vuoteen 2012	4 mrd €, 5 a 24 %/a
Kiina	2 600			30 000 MW vuoteen 2020	40 mrd €, 15 a 21 %/a
Intia	7 000			22 000 MW vuoteen 2012	30 mrd €, 5 a 25 %/a
Koko maailma	74 000	~150	1 %	~20 000 MW/a vuoteen 2011	~26 mrd €/a 21 %/a

Euroopassa oli vuoden 2007 lopussa käytössä yli 57 000 MW tuulivoimaa, ja tuotanto oli yhteensä yli 100 TWh, mikä on noin 3 % sähkön tuotannosta koko EU:ssa. Vuoden 2007 aikana Euroopassa rakennettiin 8 500 MW. Vuonna 2006 rakennettu 7 500 MW oli noin 40 % kaikesta uudesta sähköntuotantokapasiteetista ja toiseksi eniten maakaasuvoimaloiden jälkeen, joita rakennettiin 8 500 MW. Voimakkainta rakentaminen oli Saksassa (1 700 MW), Espanjassa (3 500 MW), Ranskassa (900 MW), Italiassa (600 MW), Portugalissa (400 MW), Isossa-Britanniassa (400 MW) ja Hollannissa (200 MW). Em. EU-maissa ja Tanskassa tuulivoimakapasiteetti on jo ylittänyt 1 000 MW:n rajan.

Pohjoismaista Tanskassa on tuulivoimaa 3 137 MW. Lisärakentaminen on vähäistä ja rajoittuu maalla vanhojen voimaloiden korvausrakentamiseen. Horns Revin ja Rödsandin merituulipuistojen 2-vaiheen investoinnit, yhteensä noin 400 MW, ovat suunnitteilla ja tulevat käyttöön vuosina 2009 ja 2010. Tanskassa toimivilla Vestaksella ja Siemensillä on yhteensä 35 %:n maailmanmarkkinaosuus, ja Tanskan tuulivoimateollisuus työllistää suoraan noin 25 000 henkeä.

Norjassa oli vuoden 2006 lopussa 325 MW tuulivoimaa, ja vuosituotanto, 0,7 TWh, oli noin 0,6 % sähkön käytöstä. Norjan tavoite, 3 TWh v. 2010, näyttää olevan saavutettavissa, yhteensä 1 200 MW uusia hankkeita on saanut toteutukseen tarvittavat luvat. Lupa-prosessin eri vaiheissa olevien hankkeiden teho on moninkertainen.

Ruotsin tuulivoimakapasiteetti oli vuoden 2006 lopussa 571 MW, ja tuotanto vuonna 2006 1 TWh. Ruotsissa tuulivoimalle on asetettu 10 TWh:n vuosituotantoa koskeva suunnittelutavoite ja on arvioitu, että vuoteen 2016 mennessä rakennetaan noin 7 TWh:n vuosituotantoa vastaava määrä tuulivoimaa (noin 2 500 MW).

Merituulivoiman osuus markkinoilla on vielä selvästi alle 10 % vuotuisesta lisäkapasiteetista. Merituulivoimaa on käytössä Tanskassa, Englannissa, Hollannissa, Ruotsissa, Irlannissa ja Saksassa yhteensä hieman yli 1 000 MW eli noin 2 % kaikesta Euroopan tuulivoimasta.

Maailmassa rakennetaan tätä nykyä tuulivoimaloita yli 19 000 MW/a, eli noin 25 miljardilla eurolla vuosittain. Rakentamisvauhdin ennustetaan kasvavan edelleen. Lähimmän kuuden vuoden aikana kokonaismarkkinan arvo on luokkaa 160–200 miljardia €

Teknolomiteollisuuden tuulivoima-alan toimittajat -toimialaryhmän mukaan ala työllistää tällä hetkellä yli 3 000 henkeä, ja liikevaihdon arvioidaan ylittävän 500 miljoonaa euroa v. 2007 (n. 350 milj. €v. 2006).

Suomalaisyrittäjien markkinaosuus on noin 2 %. Markkinaosuuden pitäminen ennallaan merkitsisi noin 8 miljardin €n vientiä kuuden vuoden aikana eli viennin arvon kaksin-

kertaistumista. Yritykset ovat investoineet ja investoimassa uuteen tuotantokapasiteettiin ja toimitusketjuihin sekä panostavat teknologiaosaamiseen vahvistaakseen asemiaan kasvavilla markkinoilla.

3.4.2 Tuulivoimateknologian kehitystrendejä

Tuulivoimateknologian kehitys on ollut nopeaa. Noin 25 vuoden aikana laitosten yksikköteho on noin 100-kertaistunut (30 kW – 3 MW). Samalla fyysiset dimensiot ovat kasvaneet lähes 10-kertaisiksi (roottorin halkaisija 12–100 m, tornin korkeus 20–100 m). Ensimmäiset 5 MW:n tehoiset laitokset on rakennettu, ja kehitystyö 6–8 MW:n laitoskoko kohti on menossa. Näiden suurten laitosten kaupallistuminen tapahtuu pääosin merituulivoimahankkeissa. Merituulivoiman laaja käyttöönotto edellyttää laitosteknologian ohella asennukseen ja kunnossapitoon tarvittavan infrastruktuurin kehittämistä, joka voi tapahtua isoissa demonstraatiohankkeissa.

Avainteknologioita voimaloiden koon kasvun takana ovat olleet voimaloiden lapakulman ja pyörimisnopeuden säädön kehittäminen, roottorien lavoissa käytettävien materiaalien ja rakenteiden kehittyminen sekä voimansiirron ja tornirakenteiden rakenteiden keveneminen mitoituksen ja materiaalien kehittymisen kautta.

Voimaloiden koon kasvaessa niiden tuotto on parantunut sekä paremman säädön että hyötysuhteen noston avulla, mutta ennen kaikkea siksi, että suurempien laitosten avulla päästään hyödyntämään keskimäärin parempia tuuliolosuhteita. Suomessa yli 50 m korkeiden voimaloiden huipunkäyttöaika oli keskimäärin 16 % parempi kuin alle 50 m:n korkuisten.

Laitoskoon kasvun ohella tuulipuistojen koko on kasvanut, ja tuulivoimaloiden ja tuulipuistojen säädettävyys on parantunut. Tuulipuistot rakennetaan nykyään tukemaan sähköverkon toimintaa verkon vikojen aikana. Tuotannon ennustaminen on kehittynyt helpottaen muun tuotannon suunnittelua ja pienentäen säädön kustannuksia. Maantieteellisesti laajalle alueelle rakennettu tuulivoima on käytettävissä suuremmalla todennäköisyydellä myös huippukulutuksen aikana.

3.4.3 Tuuliolosuhteet ja tuulivoimatuotannon lisäysmahdollisuudet Suomessa

Noin vuoteen 2010 asti hyödyntämiskelpoinen ja edullisin tuulivoimapotentiaali sijaitsee pääosin rannikkoseudun teollisuus- tai satama-alueilla ja niiden lähiympäristössä. Potentiaalın arvioidaan olevan joidenkin satojen megawattien luokkaa. Projektikoon kasvattamisella on mahdollista saada kustannustaso kääntymään laskuun kansainvälisen esimerkin mukaisesti. (Pöyry 2007)

Suomen maakuntaselvitysten perusteella arvioitu tekninen maksimi tuulivoimapotentiaali on lähes 10 000 MW (yli 30 TWh). Tästä määrästä noin 2 000–3 000 MW (6–9 TWh) olisi rakennusaikataulullisesti mahdollista toteuttaa vuoden 2020 loppuun mennessä. Taloudellisesti hyödyntämiskelpoinen potentiaali riippuu tuulivoimaloiden kustannuskehityksestä, sähkön hintakehityksestä markkinoilla sekä käytettävistä edistämiskeinoista. (Pöyry 2007)

Osin jo vuoteen 2020 mennessä mutta erityisesti vuoteen 2050 mennessä tuotannon lisäsmahdollisuudet paranevat todennäköisesti merkittävästi laituskoon kasvun ja tuulivoimatuotannon kilpailukyvyn paranemisen takia.

3.4.4 Tuulivoiman tuotantokustannukset ja kannattavuus

Tuulivoima on investointivaltainen tuotantomuoto. Investointikustannuksiin vaikuttavat laitoshinnan ja perustus- ja pystytyskustannusten lisäksi sijoituspaikkakohtaiset rakentamiskustannukset: tienrakennus ja sähköverkkoliitäntä. Tuulivoiman investointikustannukset laskivat voimakkaasti 1980- ja 1990-luvuilla saavuttaen noin 1 000 €/kW tason maalle rakennetulle tuulivoimalle. Viime vuosina teräksen ja kuparin hinnan nousut ovat nostaneet laituskustannuksia. Lisäksi voimakkaasti kasvava kysyntä on ylittänyt tarjonnan, mikä on myös aiheuttanut laitoshinnan nousua. Keskimääräinen investointikustannus on ollut noin 1 200 €/kW. Kysyntä on edelleen voimakkaassa kasvussa, mutta laitosten tuotantokapasiteettia, ja erityisesti komponenttien, kuten vaihteistojen, laakereiden ja suurien valujen, valmistuskapasiteettia lisätään jatkuvasti. Teknologian ja valmistusprosessien kehityksellä on tavoitteena saada laitosten valmistuskustannuksia jatkossa alennettua.

Tuulivoiman käyttö- ja ylläpitokustannuksien on arvioitu olevan 5–10 €/MWh, ja merituulivoimalle korkeammat, 15–30 €/MWh.

Merituulivoiman rakentaminen on vasta alkuvaiheessa, ja sekä investointikustannuksissa että käyttö- ja ylläpitokustannuksissa on suurempi potentiaali kustannusten alenemiseen tulevaisuudessa.

3.4.5 Kehityskenaarioita

Työssä on tehty kaksi vaihtoehtoista kehityskenaariota tuulivoiman investointi- ja käyttökustannuksille: varovainen ja optimistinen. Taulukoissa 3.2 ja 3.3 esitetyt kokonaiskapasiteettiarviot ovat asiantuntija-arvioita eräistä mahdollisista kehityskenaarioista, eivätkä ne välttämättä vastaa energiajärjestelmämallien ratkaisuna saatavaa arviota kokonaistaloudellisesta optimista.

Varovainen kehitysskenaario:

- Nykyinen tarjonnan pullonkauloista johtuva korkea investointikustannustaso säilyy.
- Laitoskoko kasvaa vain hieman nykyisestä, rajoittuu pitkänkin ajan kuluessa 4–6 MW:n tasolle.
- On todella varovainen, edellyttää kotimaisen kehityksen edellytysten parantamista: tuotantomahdollisuuksien selvitystä (kartoitukset, kaavoitusten päivitys, lupaprosessit), suunnittelutavoitteiden asetantaa ja nykyistä tehokkaampia ja kustannustehokkaampia markkinoiden edistämiskeinoja (harkitut syöttötariffipremiot, sertifikaattijärjestelmä yhdistettynä sitoviin tavoitteisiin tms., investointituet suunnataan demonstraatioihin ja/tai alueellisiin toimiin kuten poikkeukselliset verkostovahvistusinvestoinnit).

”Optimistinen” kehitysskenaario:

- Investointikustannustaso lähtee uudelleen laskuun.
- Laitoskoko kasvaa selvästi nykyisestä, pitkän ajan kuluessa 10 MW:n tasolle merkittävästi.
- Varovaiseen skenaarioon verrattuna edellyttää lisäksi meriperusratkaisujen kehittymistä, isojen laitosten teknologioiden kehittymistä, valmistusketjujen pullonkaulojen ratkaisua.

Kummassakin tapauksessa on oletettu, että laitosten luotettavuus paranee (käyttö- ja ylläpitokustannukset alenevat) ja että kilpailukyky paranee hieman suurempien laitosten paremman tuoton, parantuvan käytettävyyden sekä polttoaine- ja päästökustannusten nousun takia. Kustannusarvot on esitetty vuoden 2007 hintatasossa.

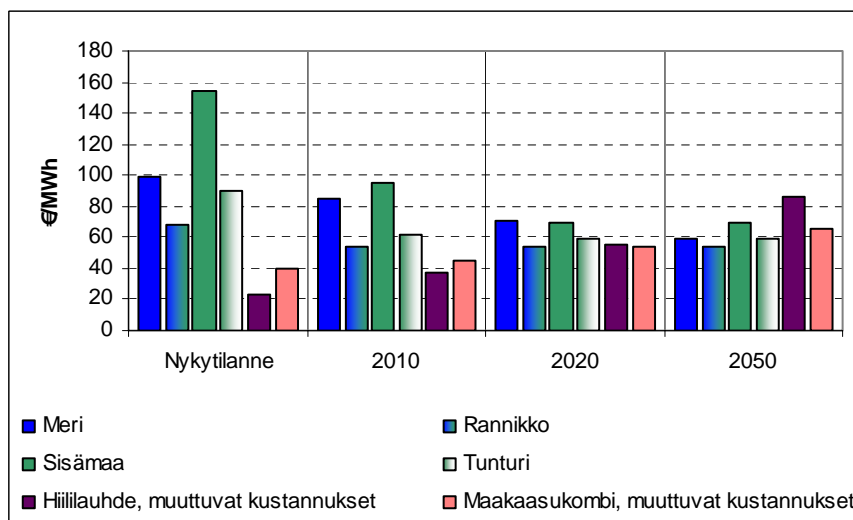
Taulukko 3.2. Tuulivoimateknologioiden kustannuksia (vuoden 2007 hintatasossa) ja niiden arvioitua markkinapotentiaalia varovaisessa kehitysarviossa.

Toimenpide / teknologia	Investointikustannus [k€/kW]		Käyttökustannus [€/MWh]		Laitoskoko, keskimäärin (yksikköteho) [MW _e]		Käyttökertoimen (netto, sis. käytettävyyden, häviöt) (%)		Arvio ko. teknologian ko- konaiskapasiteetista [MW]			
	-10	-20	-50	-10	-20	-50	-10	-20	-50	-10	-20	-50
Nykyiset voimalat	na			10	14	2				115	80	0
Uudet tuulivoimalat												
rannikolla	1,2	1,2	1,2	9	9	8	2	3	31	31	80	300
merellä	1,9	1,8	1,6	28	20	13	4	6	39	41	50	1000
Lapissa	1,3	1,3	1,3	14	13	13	2	4	32	33	20	400
sisämaassa	1,3	1,3	1,3	22	11	10	1	2	21	26	20	400
Uusintainvestoinnit												
rannikolla	1,0	1,0	1,0	9	9	8	2,5	3	31	31	10	800
merellä	na	na	1,3	28	20	13	3	2	39	41	na	1100
Lapissa	1,1	1,1	1,1	14	13	13	2	4	32	33	2	200
sisämaassa	na	na	1,1	22	11	10	1	2	21	26	na	100

Taulukko 3.3. Tuulivoimateknologioiden kustannuksia ja niiden arvioitua markkinapotentiaalia optimistisessä kehitysarviossa.

Toimenpide / teknologia	Investointikustannus [k€/kW]		Käyttökustannus [€/MWh]		Laitoskoko, keskimäärin (yksikköteho) [MW _e]		Käyttökertoimen (netto) (%)		Arvio kokonais- kapasiteetista [MW]			
	-10	-20	-50	-10	-20	-50	-10	-20	-50	-10	-20	-50
Nykyiset voimalat	na			10	14	2				100	50	0
Uudet tuulivoimalat												
rannikolla	1,0	0,9	0,8	7	7	6	2	3	31	31	80	1000
merellä	1,6	1,5	1,4	23	16	12	4	6	39	41	50	1500
Lapissa	1,1	1,0	0,9	11	10	10	2	4	32	33	20	400
sisämaassa	1,1	1,0	0,9	17	9	8	1	2	21	26	20	500
Uusintainvestoinnit												
rannikolla	0,8	0,7	0,6	7	7	6	2	3	31	31	20	90
merellä	na	na	1,2	23	16	12	4	6	39	41	na	1500
Lapissa	0,9	0,8	0,7	11	10	10	2	4	32	33	4	10
sisämaassa	na	na	0,7	17	9	8	1	2	21	26	na	200

² Merituulivoiman tuotantomahdollisuudet ovat resurssien puolesta pitkällä tähtäyksellä käytöksellä käytännössä rajattomat. Tuotantomäärä riippuu tuotantokustannuksista ja kokonaistaloudellisesta vertailusta sulhteessa muihin sähkön tuotannon vaihtoehtoihin.



Kuva 3.4. Tuulivoiman tuotantokustannukset uusinvestoinneissa, varovainen skenaario, ja hiililauhdevoiman muuttuvat kustannukset nykyisellä polttoainekustannusten tasolla ja päästöoikeushinnoilla 20 €/MWh v. 2010, 50 €/MWh v. 2020 ja 100 €/MWh v. 2050.

3.4.6 Tavoitteet ja toimenpiteet

Tuulivoiman kehitysskenaarioiden toteutuminen edellyttää tuotantomahdollisuuksien selvitystä (kartoitukset, kaavoitusten päivitys, lupaprosessit), suunnittelutavoitteiden asetantaa ja nykyistä tehokkaampia ja kustannustehokkaampia markkinoiden edistämiskeinoja (harkitut syöttötariffipreemiot, sertifiointijärjestelmä yhdistettynä sitoviin tavoitteisiin tms., investointituet suunnataan demonstraatioihin ja/tai alueellisiin toimiin kuten poikkeukselliset verkostovahvistusinvestoinnit). Lisäksi oletetaan teknologiakehityksen jatkuvan.

3.4.7 Ympäristövaikutukset

Tuulivoiman positiiviset ympäristövaikutukset ovat päästöjen vähennykset tuulivoiman korvattaessa fossiilisilla polttoaineilla tuotettua sähköä: CO₂-, NO_x-, SO₂- ja hiukkaspäästöjen vähennykset.

Tuulivoiman negatiiviset ympäristövaikutukset näkyvät tuulipuistojen lähiympäristössä:

- maisemavaikutus (vähenee suhteessa tuotantoon laitokseen kasvaessa ja merisovellusten lisääntyessä, vähemmän voimaloita näkyvillä)
- meluvaikutus ja vilkkumisvaikutus (mahdollisuus pienentää vaikutuksia parantamalla teknistä kehitystä ja hankesuunnittelua; suunnitteluohjeet)

- linnustovaikutukset (tarvitaan todellinen seurantaohjelma, muuttoreittien välttäminen, tärkeitä paikallistujen käyttäytymisen seuranta)
- meren elävät (hylkeet, kalat, äyriäiset; muualla todettu monien merieliöiden viihtyvän paremmin tuulipuistojen läheisyydessä koska perustukset tarjoavat kiinnittymispaikkoja pieneliöstölle, joka toimii ravintona ketjussa).

3.4.8 Taloudelliset vaikutukset

Tuulivoiman rakentamisella on positiivisia taloudellisia vaikutuksia suomalaiselle teollisuudelle, energiasektorille ja paikallisesti kuntataloudelle. Lisäksi tuulivoiman vaikutukset valtiontaloudelle voidaan arvioida.

Suomalainen teollisuuden markkinaosuus tuulivoiman maailmanmarkkinoilla oli vuonna 2007 noin 2 % (500 milj. EUR), ja työllistävä vaikutus on noin 3 000 htv vuodessa. Markkinavolyymin odotetaan vähintään nelinkertaistuvan vuoteen 2020 mennessä. Kotimarkkina luo edellytyksiä markkinaosuuden pitämiseen ja kasvattamiseen. Viennin vuotuinen volyyymi voi vuonna 2020 olla samaa luokkaa kuin kotimaiset investoinnit koko samana aikana.

Energiasektorilla tuulivoima näkyy päästöoikeuskustannusten pienenemisenä. Tuulivoima tuo investointitarpeita sekä uusia toimijoita sähkön tuotantoon. Sähkön tuotannon omavaraisuus lisääntyy ja polttoainekustannusriski pienenee suhteessa fossiilisiin ja biopolttoainevaihtoehtoihin.

Tuulivoiman soveltuvimmat sijoituspaikat sijaitsevat länsirannikolla ja Lapissa. Paikallisia aluetalouden hyötyä maan vuokrasta ja kiinteistöveroista saatavista tuloista. Lisäksi paikallinen palveluliiketoiminta hyötyy tuulipuistojen rakentamisesta ja ylläpidosta.

Valtion talouden kannalta tuulivoiman lisäys pienentää päästöoikeuskustannuksia ja näkyy polttoaineiden ja sähkön tuonnin ja viennin tasapainossa. Kotimarkkinat lisäävät mahdollisuuksia tuulivoima-alan teknologiavientiin. Kotimaista teknologiaa on mahdollista lisätä valtion rahoittamissa kehitysmaiden yhteisinvestointihankkeissa.

3.5 Muut uusiutuvat energianlähteet ja hajautettu tuotanto yleensä

Muita uusiutuvia energianlähteitä on huomattava määrä, mutta kaupallisia sovelluksia on lähinnä aurinkopaneeleissa, lämpöpumpuissa ja pientuulivoimassa. Prototyypivaiheeseen on päässyt aaltovoima ja lämpöpumppujen soveltaminen teollisuuden hukka-

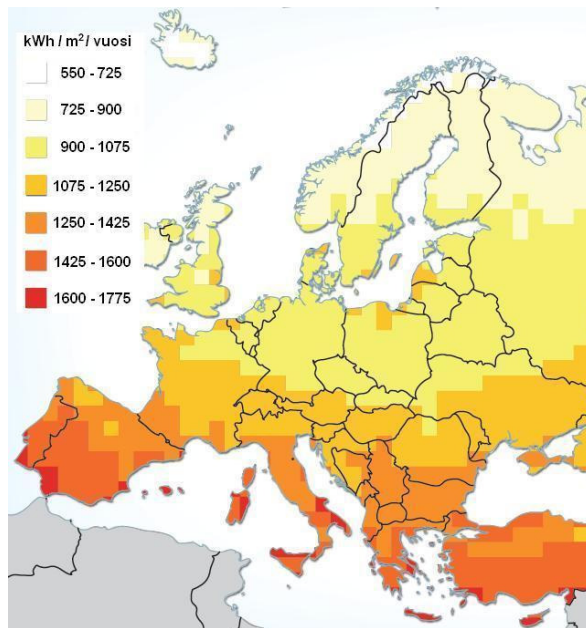
lämpöjen talteenotossa. Lisäksi perustutkimusta tehdään Suomessakin osmoosivoimalasta ja täysin uusista biomassan lähteistä kuten levistä. Aurinkoenergia on maailmanmittakaavassa saavuttamassa merkittävää osuutta, mutta muuten esitellyt teknologiat ovat vielä marginaalisessa asemassa.

3.5.1 Aurinkoenergia

Aurinkoenergiateknologiat voidaan jakaa kolmeen merkittävään pääsuuntaan: aurinkolämpöpaneeleihin, aurinkosähköpaneeleihin ja keskittäviin aurinkovoimaloihin. Suomessa vuotuinen auringonsäteily ei riitä keskittäviin aurinkovoimaloihin, jotka vaativat yli 2 000 kWh/m² vuotuisen säteilytehon kannattaakseen taloudellisesti. Näin suuri säteily määrä saadaan Euroopassa vain Välimeren aurinkoisimmilla rannoilla. Ilmatieteen laitoksen auringonpaistetilastojen mukaan keskimääräinen vuotuinen kokonaissäteily ajanjaksolla 1971–2000 vaihteli Suomessa mittausaseman sijainnin mukaan arvosta 726 kWh/m² (Kevo) arvoon 941 kWh/m² (Helsinki-Vantaa) (Ilmatieteen laitos 2008). NASAn satelliittimittauksissa koko vuoden keskimääräiseksi auringon säteilytehoksi Suomessa saatiin 500–1 000 kWh/m² (UNEP/GRID-Arendal 2008), ja näiden mittausten tulokset Suomesta ja muualta Euroopasta on esitetty kuvassa 3.5.

Aurinkopaneelit ovat modulaarisia eli niitä voidaan teoriassa kytkeä toisiinsa suuri määrä ja rakentaa iso voimala. Paneelit vaativat kuitenkin paljon tilaa, joten käytännön syistä suurin IEA:n PVPS-ohjelmassa kokeiltu aurinkosähköpaneelirykelmä on ollut yli 500 talon lähiöön rakennettu 1 MW:n hajautettu voimala (IEA-PVPS 2008). Yksittäisen talon paneeli on siinäkin teholtaan muutaman kilowatin ja tuottaa vain osan asennuskohteensa sähköstä, mutta paneelit on ostettu ja asennettu keskitetysti, jolloin hinta on saatu alemmaksi.

Aurinkopaneelien etuina ovat ilmaisen energianlähteen ja hiilidioksidipäästöttömyyden lisäksi myös muista päästöistä, esimerkiksi pienhiukkasista, vapaa energiantuotanto. Näin aurinkopaneelit eivät huononna esimerkiksi kaukolämpöverkon ulkopuolella olevan pientaloalueen ilmanlaatua kuten puun pienpoltto.



Kuva 3.5. Maan pinnalle osunut keskimääräinen auringon säteilyteho neliometriä kohden elokuun 1983 ja kesäkuun 1993 välisenä aikana (UNEP/GRID-Arendal 2008).

Paneelien yleistymistä on rajoittanut niiden korkea hinta ja kehitysvaiheessa oleva tekniikka. Suomessa paneeleja on perinteisesti käytetty ainoastaan etäisissä kohteissa, kuten kesämökeissä tai saaristossa, missä sähköjohdon vetäminen runkoverkosta olisi vielä kalliimpaa. Kymmenen viime vuoden aikana Kiinassa ja Saksassa on kuitenkin otettu käyttöön huomattava määrä lämpöpaneeleja ja Saksassa sekä Japanissa huomattava määrä sähköpaneeleja. Jokaisessa maassa teknologian merkittävä yleistyminen on vaatinut valtiolta mittavia osto- ja tuotantotukia.

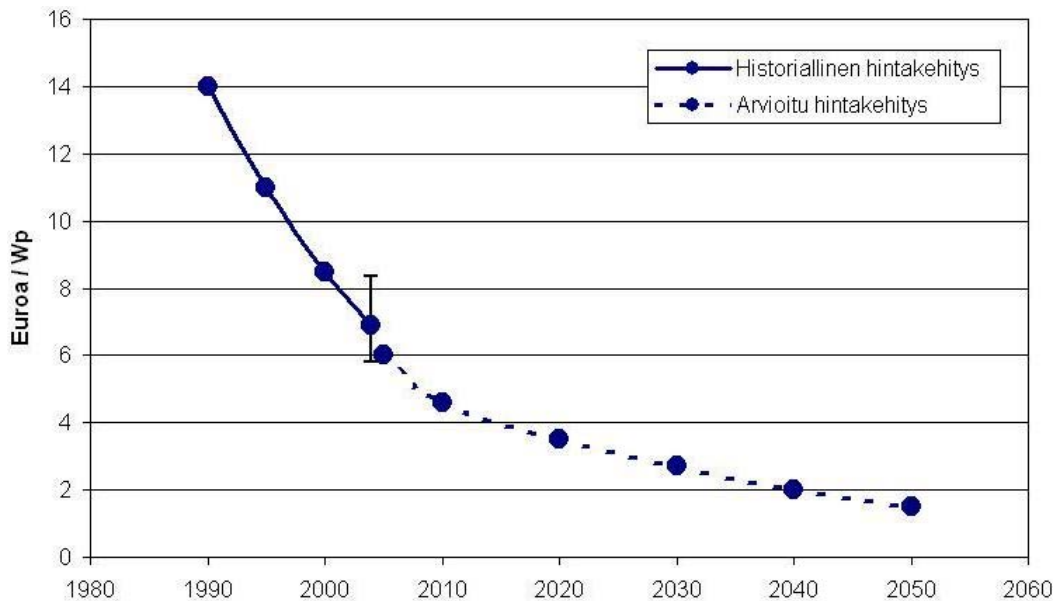
Eur'Observerin mukaan Suomessa asennettiin vuonna 2006 verkkoon kytkettyjä sähköpaneeleja 30 kW ja verkkoon kytkemätöntä hajatuotantoa 270 kW. Vuoden 2006 lopussa verkkoon kytkettyjä sähköpaneeleja oli asennettu yhteensä 223 kW ja hajatuotantoa 3,8 MW (Eur'Observ'ER 2007a). Näiden lukujen perusteella verkkoon kytkettyjen PV-paneelien yhteenlasketun nimellistehon kasvunopeus oli yli 15 % vuodessa ja aurinkosähkön hajatuotannon yli 10 %. Aurinkolämpöpaneeleja asennettiin Suomessa 2 400 m² vuonna 2006, jolloin saavutettiin 3 400 m² kokonaispinta-ala (Eur'Observ'ER 2007b). Lämpöpaneelien kokonaispinta-ala kasvoi vuonna 2006 huikeasti, noin 230 %, mutta lähtötilanne oli niin alhainen, että vuonna 2007 ja 2008 kasvu tasaantunee.

Aurinkopaneelit ottavat jatkuvasti teknologisia harppauksia. Tällä hetkellä markkinoilla olevien sähköpaneelien hyötysuhde on noin 15 %, mutta laboratoriossa on saavutettu jopa 42,8 %:n hyötysuhde. DARPA:n rahoittaman tutkimusohjelman kokonaistavoitteena on saavuttaa 50 %:n hyötysuhde laboratoriossa seuraavan vuosikymmenen aikana ja massavalmistuksessa sen jälkeen. Hyötysuhde vaikuttaa lähinnä tarvittavan pinta-alan

määrään, sillä polttoainekustannuksia ei ole. Eri yliopistojen tutkimusohjelmat tulevat parantamaan myös paneelien elinikää, joka on nykypaneeleissa noin 25 vuotta. Arvioiden mukaan elinikää saadaan uusilla tekniikoilla kasvatettua noin 40–50 vuoteen. Koska useissa paneeleissa ei ole liikkuvia osia, myös huomattavasti suurempia lukuja on esitetty eri lähteissä.

Tuotantomäärien kasvaessa paneelien hinta on pudonnut huomattavasti. IEA-PVPS-ohjelmassa kerättyjen tietojen pohjalta PV-paneelin asentaminen Euroopassa maksoi vuonna 2006 keskimäärin 7 500 euroa/kW alle 10 kW:n laitoksissa ja 6 500 euroa/kW sitä suuremmissa kokonaisuuksissa. Saksassa on jo saavutettu suuren mittakaavan edut ja siellä asentamisen kustannukset olivat noin 4 500 euroa/kW. Investointikustannusten lisäksi paneeleilla on ainoastaan huoltokustannukset, joiden Sandia arvioi olevan vuositasolla noin 0,15 % investointikustannuksista (Sandia 2008).

PV-tekniikka kehittyy huomattavan nopeasti, joten tulevaisuuden hinta-arviot ovat vaikeita tehdä ja vanhenevat suhteellisen nopeasti. Vuonna 2003 tehdyn tutkimuksen varovaisimmassa skenaariossa hinnat kehittyivät kuvan 3.6 mukaisesti (Moor et al. 2003). Kuvaan on piirretty myös vuodesta 1990 jo tapahtunut hintakehitys (IEA-PVPS 2008). Vuoden 2004 lukuarvoon on piirretty virhepalkkina PVPS-ohjelman hintakatsauksen ala- ja yläkvartaalit. Edellisen kappaleen hintatiedot olivat vuodelta 2006, joten halvimmissa maissa hintakehitys on ollut nopeampaa kuin kummassakaan esitetystä skenaarioista, kun taas pienten markkinoiden maassa, kuten Suomessa, hinnat ovat kuitenkin korkeampia kuin kuvaajaan piirretyt. Hintoihin vaikuttaa huomattavasti tuotannon kehittyminen eri komponenttien osalta. Tuotannon kehittyminen puolestaan riippuu kysynnän kehityksestä, joten on muistettava, että kustannusten laskeminen kuvien esittämällä tavalla vaatii toimenpiteitä.



Kuva 3.6. PV-paneelien jo tapahtunut hintakehitys (IEA-PVPS 2008) ja tulevaisuuden ennuste (Moor et al. 2003).

Aurinkopaneelien teoreettinen potentiaali on hyvin suuri, sillä Suomen asuntokanta on suuri ja esimerkiksi moottoriteiden varsien hukkapinta-ala laaja. Käytännössä aurinkovoiman yleistymistä kuitenkin rajoittavat monet seikat, joista merkittävin on pitkä takaisinmaksuaika. Tällä hetkellä aurinkopaneelien taloudellinen potentiaali sähköntuotannossa on mitätön, sillä ne ovat perinteisiä ratkaisuja halvempia ainoastaan ulkosaaristossa tai kesämökeillä, minne sähköjohdon vetäminen olisi hyvin kallista. Silti paneeleja asennetaan myös suurten kaupunkien keskustoihin, sillä paneelit toimitetaan yleensä yhdessä muiden energiaratkaisuiden kanssa, ja ostajat haluavat suojella ympäristöä ja hengitysilmaa.

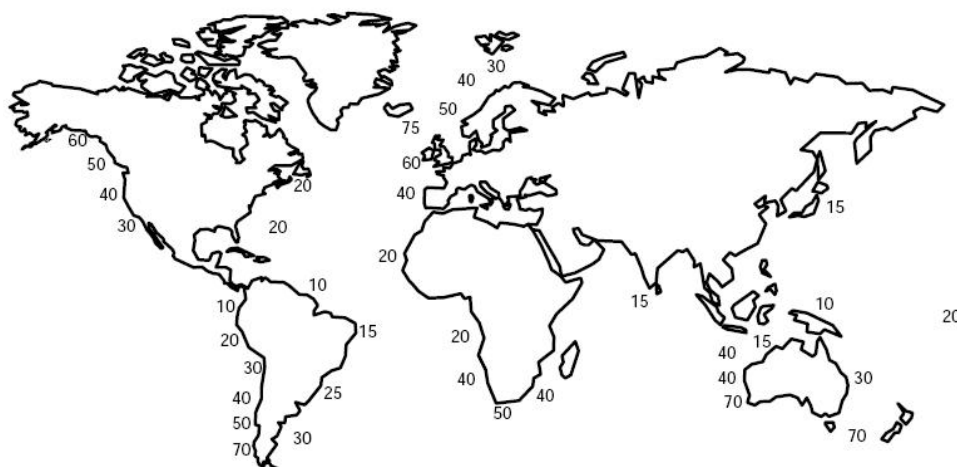
Eräs haastateltu rakennuspalvelu tarjosi rakentamisen yhteydessä yhteispakettia 4,6 m² aurinkolämpöpaneeleista, ilmalämpöpumpusta ja lattialämmityksestä 10 000 euron hintaan vuonna 2007. Pakettina nämä tulevat huomattavasti halvemmaksi, koska tekniikoita varten pitäisi kuitenkin asentaa samoja osia, kuten putkistot. Paketissa aurinkolämpö lämmittelee asuntojen käyttövettä, joten myös kesällä saatava suurempi lämpöteho saadaan hyödynnettyä. Lisäksi ilmalämpöpumppu mahdollistaa myös ilmastoinnin kesäisin. Yksittäisten lämpöpaneelien kustannukset asennettuina olisivat olleet noin 2 500 euroa (Heikkinen 2008).

Jos paneelien tekniikka ja hinta kuitenkin kehittyvät nykytahdilla, voi aurinkosähkön hinta saavuttaa fossiilisen sähkön hinnan jo lähivuosikymmeninä. Aivan eteläisimmässä Euroopassa aurinkosähkö on jo ollut halvempaa kuin sähkön piikkihintana kesäisin. Tällä hetkellä todellinen teknistaloudellinen potentiaali on kuitenkin riippuvainen valtion myöntämistä investointituista. Esimerkiksi säteilyolot ovat suunnilleen samat Etelä-Suomessa

ja Pohjois-Saksassa, mutta jälkimmäisessä on asennettuna aurinkopaneeleja huomattavasti enemmän, koska Saksassa aurinkosähkö saa noin 50 c/kWh:n (= 500 e/MWh) syöttötariffin (Eur’Observ’ER 2007a).

3.5.2 Aaltoenergia

Veden suuren tiheyden vuoksi myös aaltojen energiatiheys on huomattavan suuri. Suurin energian vuosikeskiarvo on Britannian luoteisrannikolla, missä aaltojen keskimääräinen energia on paikoin yli 90 kW/m. Talvimyrskyjen aikaan energiatiheys on huomattavasti suurempi. Kuvassa 3.7 on esitetty globaali aaltojen energiatiheyden jakauma. IEA:n merienergiaohjelmassa aaltovoiman pitkän aikavälin globaaliksi potentiaaliksi arvioitiin 8 000–80 000 TWh (IEA-OES 2006). Itämerellä tilanne ei ole aivan yhtä otollinen, sillä koko Itämeren altaassa aaltojen energiatiheyden vuosikeskiarvo jää alle 10 kW/m. Tästä huolimatta Suomessa ja Ruotsissa on ollut kiinnostusta aaltovoiman kehittämiseen.



Kuva 3.7. Aaltojen energiatiheyden vuosikeskiarvo, yksikkönä kW/m (IEA-OES 2003).

Aaltovomateknologiat voidaan karkeasti tiivistää pinta-, pohja- ja ranta-aaltoja hyödyntäviin ratkaisuihin. Pisin kokemus on ranta-aaltojen hyödyntämisestä, missä rantaan iskeytyvät aallot kerätään joko altaaseen, mistä ne valuvat turbiinin kautta takaisin mereen, tai sitten suljettuun kammioon, mistä ne puristavat ilman turbiinin kautta pois. Näiden voimaloiden ongelmana ovat pieni potentiaali, maisemahaitat ja korkeahkot rakennuskustannukset. Kirjoitushetkellä kaksi muuta voimalatyyppeä ovat saaneet aikaan parempia näyttöjä.

Pinta-aaltovoimaloissa energia kerätään talteen aaltojen mukana värähtelevillä voimaloilla, joiden generaattorit muuttavat liikkeen sähköksi. Kaksi eniten testatuista ratkaisuista ovat Pelamis ja Powerbuoy (Pelamis 2008; Powerbuoy 2008). Parhailta voima-

loilla noin 80 % pinta-aaltojen energiasta saadaan muunnettua sähköksi. Pinnalla kelluvat voimalat kumminkin altistuvat myrskyille ja muille äärimmäisille sääilmiöille ja näiden kestävydessä on ollut ongelmia. Yksikään pintavoimala ei ole kestänyt Skotlannin talvimyrskyjä ehjänä, joten yritykset testaavatkin voimaloitaan nykyään Portugalin pohjoisrannikolla, missä on Euroopan toiseksi suurin vuotuinen aaltotiheys ja huomattavasti heikommat talvimyrskyt.

Pohja-aaltoja hyödynnetään vastaavilla värähtelijöillä, joista yhtä tekniikkaa kehitetään Suomessa. Kokeellista ja taloudellista tietoa näistä tekniikoista on vasta vähän, sillä ensimmäisiä prototyyppisiä vasta asennetaan. Pohja-aallot eivät kuitenkaan vaihtelevuuden- ja vuorokaudenajan mukaan yhtä paljon kuin pinta-aallot, joten voimaloihin ei kohdistu niin suuri mekaaninen rasitus ja niiden sähköntuotto on hieman tasaisempaa.

Vuonna 2007 suurin asennettu aaltopuisto oli 3 MW, ja globaalisti asennettu kokonais-teho suuruusluokkaa 10 MW. Alustava hinta-arvio suurissa koevoimaloissa on noin 6 000–7 000 euroa / kW, mutta tekniikka on vasta ottamassa ensimmäisiä askeliaan, ja hinta pudonnee tästä selvästi massatuotannon käynnistyessä.

3.6 Ydinvoiman kehitysnäkymät

Fission perustuvaa ydinvoimaa voidaan kasvihuonekaasujen osalta käytännössä pitää nollapäästöisenä energiantuotantomuotona. Käytettäessä ydinvoimaa energiantuotantoon hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen päästöt ovat noin 0,3–4 % kivihiilen polttoon perustuvasta energiantuotannon päästöistä. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähäisyyden lisäksi ydinvoiman hyväksi puoliksi tunnustetaan varsin laajasti normaalin käytön vähäiset ympäristövaikutukset. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentymisen ohella ydinvoiman käyttö vähentää myös sähköntuotannon aiheuttamia rikki- ja typpioksi- sekä hiukaspäästöjä. Lisäksi ydinenergia tarjoaa suuren potentiaalisen energiavaranon, joka vaikuttaa koko energiahuoltoon. Koko energiasektorilla ydinvoimalla on päästöoikeuskustannuksia alentava vaikutus. Lisäksi ydinvoima vähentää riippuvuutta tuontisähköstä.

Ydinvoiman käyttö ja uusien ydinvoimaloiden rakentaminen on viime aikoina enenevästi tuotu esille yhtenä merkittävänä keinona kustannustehokkaasti hillitä kasvihuonekaasupäästöjen määrää energiantuotannossa sekä Euroopan unionissa että useissa eri maissa Euroopassa ja muissa maissa. Kuitenkin monissa maissa ydinvoiman laajentuvaa käyttöä edelleen jarruttaa yleinen ja/tai keskeisten poliittisten tahojen mielipide. Ongelmina tuodaan esille edelleen huolet ydinjätteistä huolehtimisesta, suurten onnettomuuksien mahdollisuudesta ja niiden taloudellisten vaikutusten korvaamisesta ydinvastuujärjestelyin, sekä ydinmateriaalien valvonnasta ja ydinvoiman käytön mahdollisesta yhteydestä ydinaseiden leviämiseen.

Ydinjätteiden – ja erityisesti käytetyn ydinpolttoaineen – huollossa suunnitelmat ja toteutus ovat useissa maissa etenemässä ja konkretisoitumassa muun muassa Suomessa, Ruotsissa, Ranskassa ja Yhdysvalloissa. Suomessa eduskunta vahvisti vuonna 2001 valtioneuvoston periaatepäätöksen Eurajoen Olkiluodon alueen valitsemisesta suomalaisten ydinvoimaloiden käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen sijoituspaikaksi.

Maailmassa on World Nuclear Associationin tilastojen mukaan tammikuussa 2008 käytössä 439 reaktoria, joiden asennettu sähköteho on yhteensä 372 GW. Vuonna 2006 ydinvoimalla tuotettiin sähköenergiaa yhteensä noin 2 660 TWh. Kaupallisten laitosten kumulatiivisen käyttökokemuksen määrä on tähän mennessä luokkaa 13 00 reaktori-vuotta. Ydinvoiman osuus sähkön hankinnasta on viime vuosina ollut luokkaa 16 % koko maailmassa ja Euroopan unionissa vuonna 2004 noin 31 %. Vuonna 2007 ydinvoiman osuus Suomessa tuotetusta sähköenergiasta oli noin 29 %. Uusia laitoksia on maailmalla rakenteilla 34 kpl ja lisäksi yhteensä noin 90 uuden reaktorin rakentamista on suunniteltu maailmassa tällä hetkellä.

Suomessa vuonna 2007 ydinvoimalla tuotettu sähköenergiamäärä 22,5 TWh vastaisi sähköntuotannon keskimääräisten ominaispäästöjen (0,3 Mt/TWh) mukaisesti laskettuna noin 6,6 Mt hiilidioksidipäästöjä, mikä on varsin merkittävä esimerkiksi vuoden 2006 toteutuneisiin koko sähköntuotannon hiilidioksidipäästöihin (21 Mt) verrattuna. Euroopan unionin alueella vuoden 2004 ydinenergiatuotanto oli yhteensä 986 TWh, minkä on arvioitu vastaavan 865 Mt/a CO₂-päästöjä eli noin 57 % EU-alueen yhteenlasketuista sähköntuotannon vuoden 2004 CO₂-päästöistä (1 512 Mt).

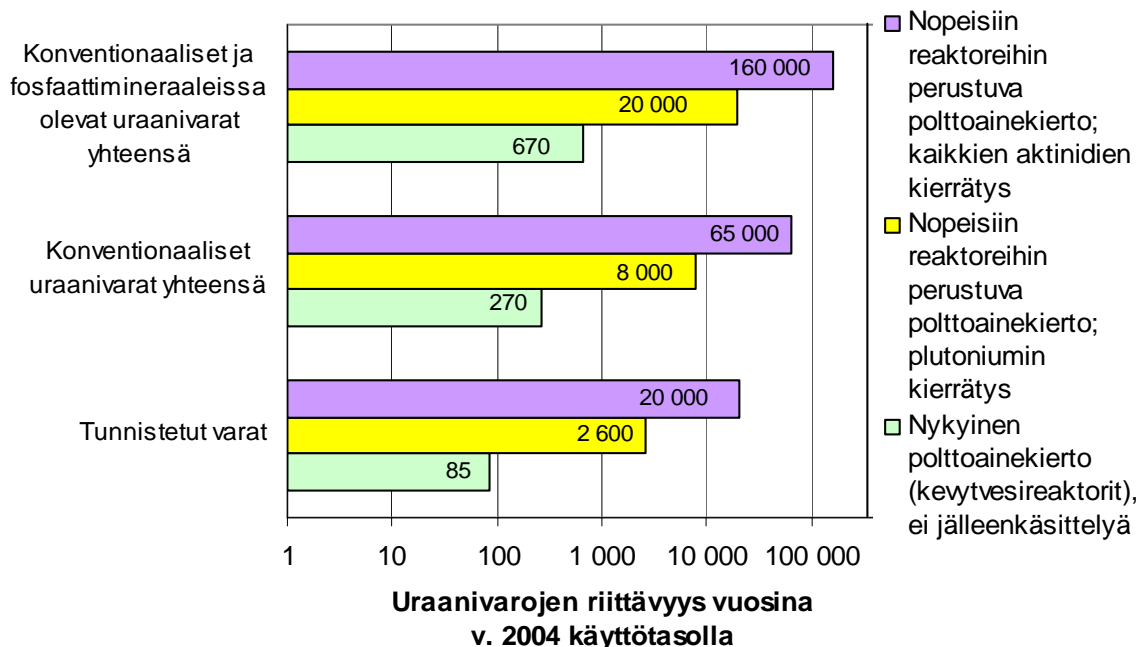
Fuusioteknologiaan perustuvien voimalaitosten rakentaminen on saattanut käynnistyä vuoteen 2050 mennessä, mikäli nyt rakenteilla olevalla ITER-kooreaktorilla sekä sen jälkeen toteutettavilla demonstraatiolaitoksilla saavutetaan odotusten mukaisia tuloksia fuusiovoimalaitoksen käytännön toteutettavuudesta. On kuitenkin epätodennäköistä, että fuusiovoimalaitoksilla voisi olla merkittävä rooli maailman energiatuotannossa vuonna 2050.

3.6.1 Nykyiset ydinvoimalaitokset ja niiden kehittämismahdollisuudet

Kun laitosten alkuperäinen suunniteltu käyttöikä on tähän mennessä ollut 30–40 vuotta, voisi merkittävä laitosten poistuma alkaa jo vuoden 2010 tienoilla. Useimpien laitosten käyttöikä on kuitenkin tarkoitus jatkaa ja monissa tapauksissa voidaan samalla nostaa myös laitosten tehoa. Esim. Ruotsissa nykyisten 10 reaktorien tehoa on kaavailtu nostettavan yli 1 100 MW:lla. Muutamissa Euroopan maissa on tehty poliittisia päätöksiä laitosten ennen aikaisesta sulkemisesta, mutta lakeja ja taloutta koskevat näkökohdat tekevät prosessista varsin hitaan. Eräitä vanhimpia laitosyksiköitä ollaan joka tapauksessa poistamassa käytöstä, koska ne ovat joko tulleet teknisen käyttöikänsä loppuun tai ovat tulleet kannattamattomiksi sähkömarkkinoiden vapautuessa.

Ydinvoimaloita valmistavan teollisuuden tuotantokyky lyhyellä aikavälillä saattaa tulla rajoittavaksi tekijäksi uuden kapasiteetin nopeaan rakentamiseen. Länsi-Euroopan, USA:n ja Itä- ja Etelä-Aasian valmistava teollisuus on kuitenkin merkittävästi tehostamassa toimintaansa mm. yritysten yhdistymisillä, ja lisääntyvä kysyntä tekee uusien tuotantolaitosten rakentamisen kannattavaksi. Osaamistaan laitosvalmistajat ovat ylläpitäneet mm. Itä- ja Etelä-Aasiaan suuntautuneilla vientihankkeilla sekä panostamalla myös voimalaitosten ikääntymisen myötä kasvaviin kunnossapitotehtäviin, uusien laitoskonseptien kehittämiseen ja nykyisten laitosten usein varsin laajoihin modernisointeihin.

Kohtuuhintaista uraania riittää hyvin käytössä ja rakenteilla olevien sekä myös realististen tulevaisuuden kehityskulkujen mukaisten uusien laitosten elinikäiseen tarpeeseen. Myös uraania huomattavasti yleisempi torium sopii tarvittaessa ydinpolttoaineeksi. Olennaisesti laajentuva ydinvoiman käyttö edellyttää kuitenkin pidemmällä aikavälillä polttoainetta tehokkaammin käyttävien reaktorien käyttöönottoa. Hyötöreaktoreilla uraanista saadaan käyttöön monikymmenkertainen energiamäärä. OECD:n ydinenergiajärjestön ja IAEA:n yhdessä kokoamien tietojen mukaan vuoden 2004 tuotantotasolla nykyisin tunnistetut uraanivarat riittävät kevytvesireaktoreissa käytettyinä lähes sadan vuoden ajan reaktorien koko elinaikaisten polttoainetarpeiden kattamiseen. Todennäköiset lisävarat huomioon ottaen uraanivarojen riittävyys nousee vastaavasti lähes 300 vuoteen. Fosfaattimineraalien sisältämän uraanin hyödyntäminen edelleen kaksinkertaistaisi uraanivarojen riittävyden nykyisenkaltaisissa reaktoreissa.



Kuva 3.8. Uraanivarojen riittävyys perustuen erilaisiin polttoainekiertoratkaisuihin ottaen huomioon tunnistetut uraanivarat, todennäköiset lisävarat sekä fosfaattimineraaleihin sisältyvä uraani (OECD 2006a; OECD 2006b).

Käytössä olevien ydinvoimalaitosten modernisointi, joka sisältää usein tehonkorotuksen ja varautumisen käyttöiän jatkamiseen, on nykyisessä tilanteessa usein hyvin kannattavaa. Hankkeet ovat vaativia, koska tuotantokyvyn ohella myös laitosten turvallisuuden edellytetään parantuvan – tavoitteena olennaisesti tiukennetut uusille laitoksille asetetut vaatimukset.

Suomalaiset laitokset ovat nyt 26–31 vuoden ikäisiä, ja niillä kaikilla on viime vuosina toteutettu käyttöluvien uudistamisen yhteydessä mittavat modernisointihankkeet. Hankkeissa tarkistettiin laitosten turvallisuus nykyisten vaatimusten valossa ja toteutettiin tarvittavia parannustoimenpiteitä. Samalla kohotettiin sähkön tuotantokykyä nostamalla laitosten tehoa ja uudistamalla käyttövarmuuden kannalta keskeisiä järjestelmiä. Lisäksi selvitettiin laitosten käyttöikä rajoittavia tekijöitä ja ryhdyttiin niiden eliminointiin. Tärkeänä oheistavoitteena oli henkilöstön osaamistason kehittäminen.

Olkiluodon laitoksen modernisoinnin päätuloksina laitos sai käyttöluvalle 20 vuoden jatkon vuonna 1998, ja laitoksen sähkötehoa voitiin nostaa 260 MW. Valtaosa tehon lisäyksestä saatiin kohottamalla kummankin reaktorin lämpötehoa lähes 16 % nykyiseen arvoon 2 500 MW ja loppu prosessin termisen hyötysuhteen parannuksin uusimalla joi-takin komponentteja. Todettakoon, että laitoksella oli jo aiemmin vuonna 1984 toteutettu 8 %:n reaktoritehon nosto. Toinen päätarkoitus oli varmistaa, että laitoksella voi olla ainakin 40 vuoden käyttöikä edessään, jolloin kokonaisuksi tulisi ainakin 60 vuotta.

Loviisan laitoksen modernisointihankkeessa nostettiin laitoksen tehoa noin 90 MW. Valtaosa tästä saavutettiin nostamalla reaktorien lämpötehoa 9 % nykyiseen arvoon 1 500 MW. Käyttöluvaa jatkettiin vuonna 1997 kymmenellä vuodella, minä aikana on luotu edellytykset sille, että laitoksen käyttöikä katsottiin voitavan nostaa alun perin ajatellusta 30 vuodesta 50 vuoteen, kun valtioneuvosto kesällä 2007 päätti Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöluvan jatkamisesta 20 vuodella.

Laitosten kannattavuutta voidaan parantaa myös polttoainehuoltoa ja käyttötoimintaa tehostamalla. Polttoainekustannusten osuus ydinsähkön tuotantokustannuksista on nykyisillä uraanin hinnoilla vain noin viidennes, mutta polttoainetalouttakin voidaan parantaa kilpailukyvyn kannalta merkittävästi. Voidaan arvioida, että Olkiluodon voimalan tähänastisen käytön aikana on uusien polttoainetyyppien käyttöönotolla ja polttoaineen käytön suunnittelumenetelmiä parantamalla saavutettu jo 15–20 %:n säästö polttoaineen kulutuksessa. Erityisesti polttoaineen poistopalaman nostaminen nykyisestä 35–40 MWd/kgU tasolle 50–60 MWd/kgU voi tarjota edelleen merkittäviä säästömahdollisuuksia. Kokemukset suurista palamista osoittavat kuitenkin tarpeen edetä varovaisesti varmistautuen korkeapalalaisen polttoaineen käyttövarmuudesta ja turvallisuudesta häiriö- ja onnettomuustilanteissa.

Useimmissa maailman maissa – vähemmän Suomessa – on huomattavat mahdollisuudet parantaa ydinvoiman tuotannon kannattavuutta nostamalla laitosten käyttökerrointa sekä tehostamalla muutenkin käyttötoimintaa. Esimerkiksi polttoaineen vaihtoseisokit vievät muissa maissa tyypillisesti yleensä 35–50 päivää, kun Suomessa normaalivuosina päästään 10–20 päivään.

3.6.2 Ydinvoiman käytön laajentaminen Suomessa ja muissa maissa

Lähivuosina tulee uusia laitoksia käyttöön lähinnä Itä- ja Etelä-Aasiassa sekä Venäjällä ja Itä-Euroopan maissa, minkä lisäksi Suomessa Olkiluotoon rakenteilla olevan EPR-laitoksen (1 600 MW) ohella myös Ranskassa on jo aloitettu EPR-laitoksen rakentaminen Flamanvilleen. Myös Isossa-Britanniassa on käynnistetty valmistelut käytöstä poistuvien reaktorien korvaamisesta rakennettavilla uusilla laitoksilla. Lisäksi Baltian maat ja Puola ovat suunnittelemassa yhteisen laitoksen rakentamista Liettuan Ignalinaan korvaamaan siellä vuoteen 2010 mennessä suljettavan RBMK-reaktoriyksikön (Ignalina 2) sähköntuotannon.

Suomessa ydinvoimalaitosten rakentaminen edellyttää valtioneuvostolta periaatepäätöstä siitä, onko laitoksen rakentaminen yhteiskunnan kokonaisedun mukaista. Eduskunnan tulee vahvistaa valtioneuvoston tekemä päätös. Periaatepäätös-hakemuksen liitteenä tulee olla laitoksen rakentamista koskevan ympäristövaikutusten arviointimenettelyn tuottama arviointiselostus. Voimayhtiöt (TVO, Fortum ja Fennovoima) ovat käynnistäneet tai käynnistämässä ympäristövaikutusten arviointimenettelyt Olkiluodon ja Loviisan laitospaikkojen sekä neljän uuden sijoituspaikan osalta. Ympäristövaikutuksia arvioitaessa ei tarkkaan määritellä laitostyyppiä tai laitoksen toimittajaa. Yhteysviranomainen eli työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) antaa oman lausuntonsa laadittavista arviointiohjelmista ja -selostuksista. Varsinaisen periaatepäätöshakemuksen jättämisestä valtioneuvoston käsiteltäväksi voimayhtiöt eivät kuitenkaan ole vielä esittäneet lopullisia suunnitelmiaan.

Suomessa ja kansainvälisesti (mm. OECD 2005) tehtyjen tuotantokustannusvertailujen mukaan ydinvoiman tuotanto on taloudellisesti edullista verrattuna vaihtoehtoihin tuotantotapoihin, jotka perustuvat kivihiilen, maakaasun tai uusiutuvien energiavarojen käyttöön. Hiilidioksidin päästökaupan mukaisten päästökauppamaksujen sisällyttäminen fossiilisia polttoaineita käyttävien vaihtoehtojen kustannuksiin parantaa edelleen ydinvoiman taloudellista kilpailukykyä merkittävästi.

Uusien kevytvesireaktorivoimaloiden edistyminen riippuu tällä hetkellä ennen kaikkea voimayhtiöiden todellisesta kiinnostuksesta panostaa kehittämiseen ja hankkia tällaisia laitoksia viimeistään ensi vuosikymmenen puolivälistä lähtien. Amerikkalaiset ja

eurooppalaiset voimayhtiöt ovat määritelleet, millaiset vaatimukset tulevaisuuden laitosten tulee täyttää, jotta ne yhtiöille aikanaan kelpaisivat. Tarkoituksena on sekä mahdollistaa kilpailu erilaisten mutta yhteiset vaatimukset täyttävien konseptien välillä että vahvistaa ydinvoiman kilpailukykyä nopeaa, halpaa ja luotettavaa toteutusta edistävän standardoinnin avulla.

3.6.3 Pitkän aikavälin uudet fissioreaktorit

Nykyisistä kevytvesireaktoreista selvästi poikkeavat kaasujäähdytteiset korkealämpötila-reaktorit (HTR) ja nestemetallijäähdytteiset hyötöreaktorit (LMFBR) näyttäisivät tarjoavan hyviä turvallisuusominaisuuksia ja suuria parannuksia uraanin käytön tehokkuudessa. Molemmista on jo prototyyppitasoisen käytännön kokemusta.

Kaikki viisi 1960–80-luvuilla käytössä ollut HTR-tyypin demonstraatio- ja prototyyppilaitosta on nyt suljettu, mutta kehittämistyötä on käynnissä erityisesti Japanissa, Kiinassa, Venäjällä ja Etelä-Afrikassa, minkä lisäksi EU:n tutkimuksen puiteohjelmassa panostetaan aiheeseen. HTR:n lisäetu on mahdollisuus tuottaa korkea-arvoista höyryä teollisuusprosessien tarpeisiin; mm. vedyntuotantoon.

Hyötöreaktorit tuottavat luonnonuraanin vallitsevasta isotoopista U-238 helposti halkeavaa plutoniumin isotooppia Pu-239 neutronien absorptioon avulla, minkä ansiosta uraanista saatava energiamäärä monikymmenkertastuu. Ns. suljettu polttoainekierto mahdollistaa myös pitkäikäisten ydinjätteiden määrän oleellisen vähentämisen (aktinidien uudelleenkierrätys). Näin käytettynä uraani voi olla olennainen pitkän ajan energialähde.

Tärkeimmät hyötöreaktorit ovat tällä hetkellä Venäjällä ja Ranskassa. Venäjällä Belojarskissa vuonna 1981 käynnistynyt BN-600-laitos on kaupallisessa käytössä, minkä lisäksi kahden 800 MW:n laitoksen rakentaminen on ollut vireillä. Ranskassa on viime vuosiin asti jatkettu edelleen tutkimusta jo yli 30 vuotta käytössä olleella 250 MW:n Phenix-laitoksella. Kazakstanissa vuonna 1973 käynnistynyt BN-350-laitos, joka tuotti lähinnä lämpöä suolanpoistoon, suljettiin lopullisesti vuonna 1999. Ranskassa oli lyhyen ajan käytössä myös 1 200 MW:n Super-Phenix-hyötöreaktori, mutta se jouduttiin sulkemaan teknisten ongelmien vuoksi.

Viime vuosina erityisesti sekä Euroopassa että USA:ssa on panostettu uuden reaktori-tekniikan perustutkimukseen, jossa tähdätään selvästi nykyisiä laitoksia kilpailukykyisempiin, polttoainetta tehokkaammin käyttäviin, vähemmän ydinjätettä tuottaviin, hyötysuhteeltaan parempiin ja ydinmateriaalin leviämistä varmemmin rajoitettaviin reaktortyyppisiin. Nämä ns. neljännen sukupolven voimalat ovat pääosin olleet esillä jo varhaisempina aikoina, mutta materiaali- ja tekniikan edistyminen ja uudet tuottavuus- ja

turvallisuusvaatimukset ovat tuoneet ne uuteen tarkasteluun. Kehitystyöhön on liittynyt yhdeksän muuta maata sekä Euroopan unioni. Tämä yhteenliittymä (Generation IV International Forum GIF; GIF 2002) on vuonna 2002 valinnut kuusi reaktorityyppiä lähempään tarkasteluun (Taulukko 3.4).

Euroopassa EU:n puitteissa on perustettu syyskuussa 2007 uusi teknologiayhteisö Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP 2007), jonka tavoitteena on pannaostaa nykyisten ydinvoimalaitosten käyttöään jatkamiseen säilyttäen tai parantaen niiden turvallisuustasoa, edistää ns. kolmannen polven reaktorien, kuten Suomeen ja Ranskaan jo rakenteilla olevat EPR-laitokset, rakentamista korvaamaan käytöstä poistuvia laitoksia sekä pidemmällä aikavälillä suljettuun polttoainekiertoon perustuvien nopeiden reaktorien kehittämiseen. Ranskassa on jo päätetty toteuttaa uuden, merkittävästi kehitetyn natrium-jäähdytteisen nopean reaktorin rakentaminen noin vuoteen 2020 mennessä.

Taulukko 3.4. Kehitystyön kohteena olevia uusia reaktorityyppejä ja niiden ominaisuuksia (GIF 2002).

GFR	Kaasujäähdytteinen nopea reaktori (Gas Cooled Fast Reactor), heliumjäähdytys, jäähdytteen ulostulolämpötila 850 °C, kokoluokka 290 MWe
VHTR	Hyvin korkealämpötilainen reaktori (Very High Temperature Reactor), grafiittimoderointi, heliumjäähdytys, jäähdytteen ulostulolämpötila 1 000 °C, kokoluokka 600 MWt
SCWR	Ylikriittisessä paineessa toimiva vesijäähdytteinen reaktori (Supercritical Water Cooled Reactor), voi toimia sekä termisenä että nopeana reaktorina, jäähdytteen ulostulolämpötila yli 500 °C, kokoluokka 1 700 MWe, vastaava eurooppalainen projekti High Performance Light Water Reactor HPLWR
SFR	Natriumjäähdytteinen nopea reaktori (Sodium Cooled Fast Reactor), sydämen ulostulolämpötila n. 550 °C, kokoluokat 150–500 MWe ja 500–1500 MWe
LFR	Lyijyjäähdytteinen nopea reaktori (Lead Cooled Fast Reactor), jäähdytteen ulostulolämpötila noin 550–800 °C, eri kokoluokat mahdollisia 50–1 200 MWe
MSR	Sulasuolareaktori (Molten Salt Reactor), nestemäinen polttoaine, joka myös kiertää ensijäähdytyspiirinä, grafiittimoderointi, epiterminen vuo, jäähdytteen ulostulolämpötila 700–800 °C, kokoluokka 1 000 MWe

3.6.4 Fuusioreaktorit

Energiaa vapautuu myös fuusiossa, keveiden atomiydinten yhdistymisessä. Fuusiopolttoainetta olisi käytännössä saatavissa kattamaan merkittävä osa ihmiskunnan energian tarpeesta vuosituhansiksi. Tärkeäksi kaupalliseksi energianlähteeksi fuusio ehtii aikaisintaan useamman vuosikymmenen kestävän koe- ja demonstraatioreaktorivaiheen jälkeen.

Fuusioteknologian kehittämiseen käytetään paljon julkisia tutkimusvaroja. EU:n fuusio-ohjelman vuotuinen laajuus on huomattavasti suurempi kuin fissioydinenergian tutkimukseen suunnattu EU-rahoitus. Voidaan katsoa, että Eurooppa on tällä hetkellä johtavassa asemassa fuusion kehittämisessä. Suomen fuusiotutkimusohjelma on täysin yhdistetty EU:n ohjelmaan, ja siinä keskitytään tukemaan hankkeita, jotka luovat suomalaisille yrityksille edellytyksiä toimittaa materiaaleja, laitteistoja ja palveluita fuusiokoereaktoreille.

Cadarachessa, Ranskassa, on rakenteilla laajana kansainvälisenä yhteistyönä ITER-koereaktori (International Thermonuclear Experimental Reactor). Koelaitoksen tarkoituksena on osoittaa, että tämän päivän teknologialla voidaan rakentaa yli 1 000 MW:n lämpötehoisen koereaktori. Seuraavana vaiheena on suunniteltu rakennettavaksi sähköä tuottava demonstraatioluokan laitos (DEMO), jossa testattaisiin pitkäaikaisen käytön mahdollistavia materiaaleja. DEMO-vaiheessa pyrittäisiin jo kaupalliseen kilpailuun.

Fuusioenergian turvallisuus- ja ympäristöarvioinneissa päätellään, että fuusioreaktorit tulevat olemaan luonnollisesti turvallisia, niiden käytöstä ei aiheudu hyvin pitkäikäisiä korkea-aktiivisia jätteitä ja ne ovat edullisia myös ydinmateriaalien valvonnan kannalta. Koska fuusiovoimalaitos on vasta kehitysvaiheessa, fuusiovoiman kustannuksia ei voida vielä uskottavasti arvioida.

3.6.5 Kehitysskenaarioita

Taulukoissa 3.5 ja 3.6 on esitetty varovainen ja optimistinen arvio ydinvoimateknologian tulevaisuudennäkymistä. Taulukot sisältävät teknologisten ja taloudellisten parametrien lisäksi myös karkean arvion ydinvoiman määrästä eri skenaarioissa vuosille 2020 ja 2050. Kokonaiskapasiteettiarviot ovat asiantuntija-arvioita eräistä mahdollisista kehityskäytännöistä, eivätkä ne välttämättä vastaa energiajärjestelmämallien ratkaisuna saatavaa arviota kokonaistaloudellisesta optimista.

Taulukko 3.5. Eri teknologioiden ja toimenpiteiden kustannuksia (vuoden 2007 hintatasossa) ja niiden arvioidut energiansäästö- ja markkinapotentiaalit varovaisessa kehitysarviossa.

Toimenpide / teknologia	Investointi-kustannus [k€/kW]		Käyttö-kustannus [€/MWh]		Laitoskoko (teho) [GW _e]		Käyttö-kerroin (%)		Tyypill. tekninen käyttöaika [a]	Arvio khk-päästövähennyksestä/potentiaalista (laskettuna ka. ominaispäästöistä(£))		Arvio ko. teknologian maksimipotentiaalista @ kokonaistuotannosta [%]	
	-07	-20	-07	-20	-07	-20	-07	-20		2020	2050	2020	2050
Käytössä olevat													
<i>Lovisa 1 & 2</i>	-	-	§		1	1	90	90	50				
<i>Olkiluoto 1 & 2</i>	-	-			1,7	1,7	93	93	60				
Rakenteilla olevat													
<i>Olkiluoto 3 (2011→)</i>	1,9		§		1,6	1,6	93	93	60				
Lisätoimenpiteet:													
<i>Olkiluoto 1 & 2 modernisointi (n. 2020)</i>		0,6		§		0,3	93	93	20				
<i>Yksi lisäyksikkö FIN6 (LWR) ≤ 2020</i>		2,3		§		1,7	93	93	60				

£ CO₂-päästön vähennys laskettuna nykyisen sähköntuotannon keskimääräisten ominaispäästöjen perusteella on noin 0,3 MuTWh ja luokkaa 0,8 MuTWh, mikäli ydinvoimalla korvataan kivihiihikäyttöistä sähköntuotantokapasiteettia

§ Polttoaine- sekä ydinjätteenkäyttö- ja käyttöäpoistokustannukset noin 6 €/MWh ja muut käyttöäpoistokustannukset n. 8 €/MWh

@ Suhteellinen maksimipotentiaali ydnergian käytölle on luokkaa 50–60 % kokonaissähköntuotannosta; vuonna 2050 kaikki nykyisin käytössä olevat ydinvoimalatokset on poistettu käytöstä ja suhteellisesti maksimipotentiaalissa on otettava huomioon vain uudet ydinvoimalatokset (mukaan lukien Olkiluoto 3) sekä sähköenergian ennustettu kokonaiskulutustas vuonna 2050

Taulukko 3.6. Eri teknologioiden ja toimenpiteiden kustannuksia (vuoden 2007 hintatasossa) ja niiden arvioidut energiansäästö- ja markkinapotentiaalit optimistisessa kehitysarviossa.

Toimenpide / teknologia	Investointi-kustannus [k€/kW]		Käyttö-kustannus [€/MWh]		Laitoskoko (teho) [GW _e]		Käyttö-kerroin (%)		Tyypill. tekninen käyttöaika [a]	Arvio khk-päästövähennyksestä/potentiaalista (laskettuna ka. ominaispäästöistä(£))		Arvio ko. teknologian maksimipotentiaalista @ kokonaistuotannosta [%]	
	-07	-20	-07	-20	-07	-20	-07	-20		2020	2050	2020	2050
Käytössä olevat													
<i>Lovisa 1 & 2</i>	-	-	§		1	1	90	90	50				
<i>Olkiluoto 1 & 2</i>	-	-			1,7	1,7	93	93	60				
Rakenteilla olevat													
<i>Olkiluoto 3 (2011→)</i>	1,9		§		1,6	1,6	93	93	60				
Lisätoimenpiteet:													
<i>Olkiluoto 1 & 2 modernisointi (2020)</i>		0,6		§		0,3	93	93	20				
<i>Kaksi lisäyksikköä LWR 2018 & 2020</i>		2,3		§		3,4	93	93	60				
<i>Yksi lisäyksikkö LWR ≤ 2035</i>		2,3		§		1,7	93	93	60				
<i>Yksi lisäyksikkö VHTR 2050 tuottaa sähköä ja prosessi-lämpöä/vetyä</i>		2		§		1,0	93	93	60				

£ CO₂-päästön vähennys laskettuna nykyisen sähköntuotannon keskimääräisten ominaispäästöjen perusteella on noin 0,3 MuTWh ja luokkaa 0,8 MuTWh, mikäli ydinvoimalla korvataan kivihiihikäyttöistä sähköntuotantokapasiteettia

§ Polttoaine- sekä ydinjätteenkäyttö- ja käyttöäpoistokustannukset noin 6 €/MWh ja muut käyttöäpoistokustannukset n. 8 €/MWh

@ Suhteellinen maksimipotentiaali ydnergian käytölle on luokkaa 50–60 % kokonaissähköntuotannosta; vuonna 2050 kaikki nykyisin käytössä olevat ydinvoimalatokset on poistettu käytöstä ja suhteellisesti maksimipotentiaalissa on otettava huomioon vain uudet ydinvoimalatokset (mukaan lukien Olkiluoto 3) sekä sähköenergian ennustettu kokonaiskulutustas vuonna 2050

3.7 Hiilidioksidin erotus ja varastointi (CCS)

3.7.1 Yleistä

Fossiilisen energian osuus maailman primaarienergian käytöstä on yli 80 prosenttia. Jos pyritään rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen EU:n esittämän tavoitteen mukaisesti, tulee IPCC:n vuoden 2007 arviointiraportin mukaan rajoittaa maailman päästöjä 50–85 prosenttia vuoden 2000 tasosta. Tämä on erityisen haastavaa, koska samanaikaisesti maailman väestö, talous ja energiankulutus kasvavat. Lisäksi tuotantokustannuksiltaan edullista fossiilista energiaa, etenkin kivihiihtä, on runsaasti tarjolla mm. monissa voimakkaasti kasvavissa kehitysmaissa kuten Kiinassa ja Intiassa. Hiilidioksidin erotus ja varastointi (Carbon Capture and Storage, CCS) nähdäänkin hyvin merkittävänä keinona rajoittaa kasvihuonekaasupäästöjä. Tätä teknologiaa edistävät monet maat ja maaryhmät kuten EU, USA, Japani ja suuret kehitysmaat.

Hiilidioksidin erotuksessa ja varastoinnissa erotetaan fossiilisen polttoaineen sisältämä hiili CO₂:na ja varastoidaan geologisiin muodostumiin, kuten vanhoihin öljy- ja kaasukenttiin tai maanalaisiin suolavesikerrostumiin. Näin voidaan tuottaa fossiilisen polttoaineen avulla energiaa niin, että hiilidioksidipäästöt vähenevät murto-osaan siitä, mitä ne olisivat ilman CCS:ää. Hiilidioksidia voidaan erottaa myös kemiallisissa prosesseissa syntyneistä prosessikaasuista. Erotettu ja kokoon puristettu hiilidioksidi siirretään putkijonossa tai laivalla varastointipaikalle.

3.7.2 Erotusteknologiat

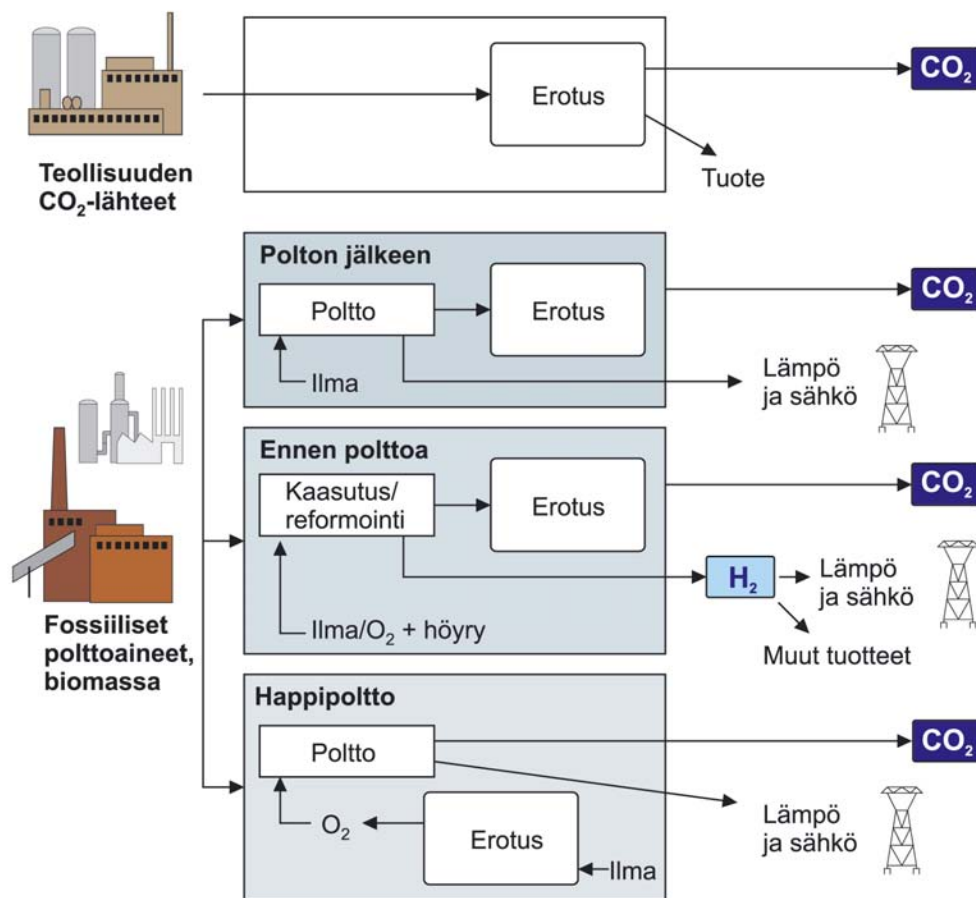
Teollisuudessa on kaupallisessa käytössä useita hiilidioksidin erotusteknologioita, joiden erotusmäärät ovat pieniä verrattuna mahdolliseen erotukseen energiantuotannon yhteydessä. Erotettua hiilidioksidia käytetään muun muassa paperi-, virvoitusjuoma- ja elintarviketeollisuudessa. Näissä sovelluksissa hiilidioksidi ei yleensä sitoudu tuotteen pitkiksi ajoiksi, mitä tarvittaisiin, jos tavoitteena on hillitä kasvihuoneilmiötä. Luonnollisten hiilidioksidivarastojen purkamista teollisiin tarkoituksiin kannattaisi tietenkin välttää ja korvata se kannattavasti talteenotetulla hiilidioksidilla, mutta määrät ovat joka tapauksessa erittäin pieniä verrattuna voimalaitosten päästöihin.

Voimalaitoksen savukaasuista suurin osa on muita kaasuja kuin hiilidioksidia, kuten typpeä, minkä vuoksi tarvitaan suhteellisen mutkikkaita fysikaalisia tai kemiallisia tekniikoita hiilidioksidin erottamiseksi. CCS-sovelluksissa laajimmin käytetty pesuliuotin on MEA (monoethanolamine). Muita potentiaalisia amiiniliuottimia ovat mm. MDEA (methyldiethanolamine), AMP (amino-2-methyl-1-propanol) ja DEA (ecoamine). Amiinien ohella kehitetään myös muiden liuottimien, kuten esimerkiksi jäähdytetyn ammo-

niakin, käyttöön perustuvia pesuprosesseja. Kehitystyössä pyritään etenkin alentamaan CO₂:n erottamiseen tarvittavan energian määrää ja siten erottamisen kustannuksia.

Energiantuotantoprosesseissa CO₂:n talteenotto voidaan toteuttaa usealla eri tavalla eri vaiheissa prosessia (kuva 3.9). Karkeasti jaoteltuna talteenotto voidaan toteuttaa joko ennen polttoa tai polton jälkeen. Ennen polttoa talteenotto voidaan toteuttaa maakaasuvoimalaitosten ja kaasutusvoimalaitosten yhteydessä. Tällöin kaasun sisältämä hiili konvertoidaan (reformointi, vesikaasureaktio) hiilidioksidiksi, joka pestään kaasusta. Savukaasuista polton jälkeen tapahtuva CO₂-talteenotto puolestaan voidaan toteuttaa sekä edellä mainittujen maakaasu- ja kaasutusvoimalaitosten että tavanomaisen polton tai happipolton yhteydessä.

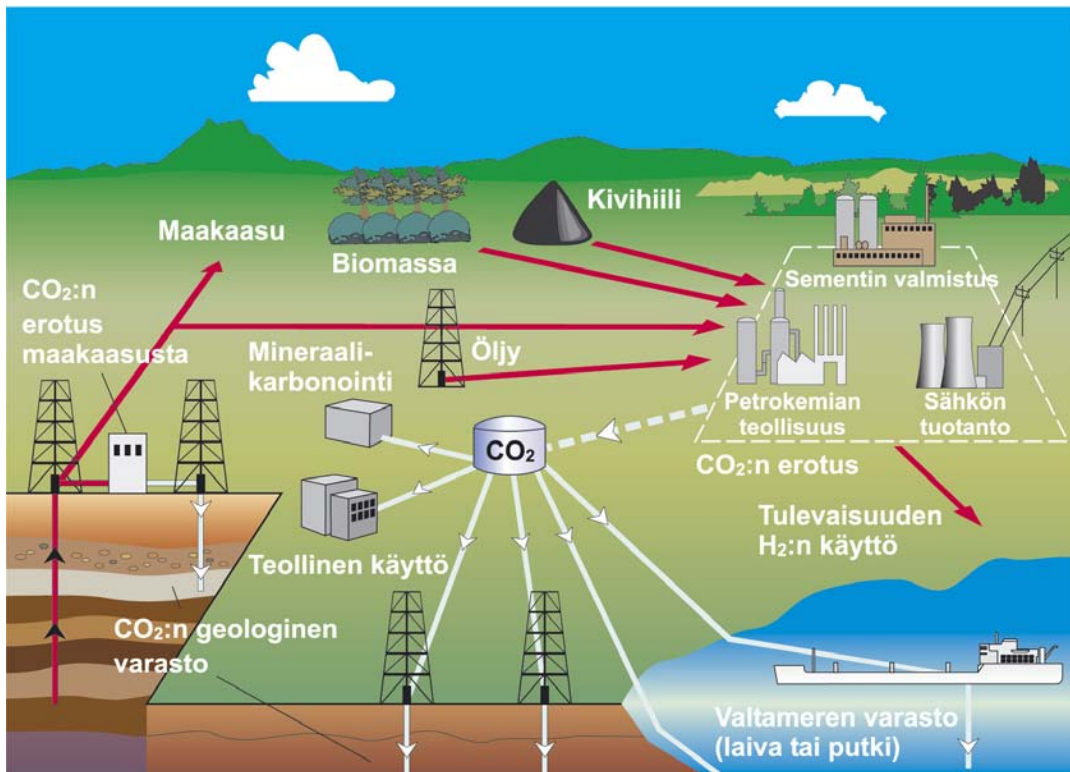
Happipoltossa polttoaine poltetaan ilman sijasta puhtaan hapen ja savukaasun eli käytännössä hiilidioksidin seoksella. Hapen laimennus savukaasulla on välttämätöntä palamisreaktion hallitsemiseksi. Happipoltossa on etuna, että savukaasu ei sisällä typpeä, minkä vuoksi typen erotusta ei tässä vaiheessa tarvita. Sen sijaan polttoa varten happi tulee erottaa ilman tyypestä. Erotus ilmasta on kuitenkin helpompaa kuin savukaasuista erottaminen ja happipoltolla saavutetaan muitakin etuja, kuten ilman tyypestä peräisin olevien NO_x-päästöjen välttäminen. Teknologioita voidaan periaatteessa soveltaa myös biomassapohjaisen hiilidioksidin erottamiseen savukaasusta, jos vain laitoksen mitta-kaava on niin suuri, että erotus on taloudellisesti perusteltua.



Kuva 3.9. Periaatekuva hiilidioksidin erotuksesta teollisuudessa sekä energiantuotannossa polton jälkeen, ennen polttoa ja happipoltossa (IPCC 2005).

3.7.3 Hiilidioksidin siirto ja varastointi

Erotettu ja kokoon puristettu hiilidioksidi kuljetetaan putkessa tai laivalla varastopaikalle (kuva 3.10). Varastoja voivat olla esimerkiksi geologiset muodostumat, kuten käytetty öljy- ja kaasukentät, suolaisen veden täyttämät huokoiset kivikerrokset tai tietyn huokoisuuden omaavat kivihilikerrostumat, jotka ovat kannattamattomia louhittaviksi. Myös valtameri on periaatteessa mahdollinen varasto, siellähän on jo tavattoman suuri määrä hiiltä. Teollisessa mittakaavassa tehdään jo maakaasun tuotannon yhteydessä erotetun hiilidioksidin sijoitusta huokoiseen suolaveden täyttämään hiekkakiveen Pohjanmerellä norjalaisella Sleipnerin kaasukentällä. USA:ssa ja Kanadassa käytetään hiilidioksidia hiipuvan öljykentän tuotannon lisäämiseen (EOR; Enhanced Oil Recovery) useissa kohteissa, jolloin kenttään pidättyy hiilidioksidia. Yhtä demonstraatiokohdetta lukuun ottamatta hiilidioksidi on kuitenkin peräisin luonnollisista hiilidioksidiesiintymistä eikä esimerkiksi voimalaitosten savukaasuista.



Kuva 3.10. Hiilidioksidin erotus- ja varastointivaihtoehtoja. Hiilidioksidin erotus voi tapahtua energian tuotannossa tai teollisuudessa. Hiilidioksidi voidaan kuljettaa varastointipaikoille putkessa tai laivalla. Mahdollisia varastoja ovat esimerkiksi ehtyvät kaasu- ja öljykentät, suolaisen pohjaveden muodostumat, kivihiilikerrostumat sekä periaatteessa myös valtameri, kiinteät mineraalit ja teollisuuden jätekuona (IPCC 2005).

3.7.4 Teknologian kypsyyt

Hiilidioksidin erotuksen teknologia on kypsää markkinateknologiaa kemianteollisuuden prosessien osalta, samoin puhtaan hiilidioksidin käytön osalta (taulukko 3.7). Hiilidioksidin siirtoputkia on myös lukuisia etupäässä USA:ssa, jossa luonnon maanalaisia hiilidioksidilähteitä käytetään öljyn tuotannon tehostamiseen (Enhanced Oil Recovery, EOR).

Kemianteollisuudessa hiilidioksidinpoisto on osa prosessia, joka ei käytännössä poikkea normaalista kemianteollisuudesta. Tällaiset sovellukset ovat kuitenkin kustannusrakenteeltaan varsin erilaisia verrattuna energiantuotantoprosessiin, jossa hiilidioksidin poiston tuloksena ei käytännössä tuoteta mitään kaupallisesti arvokasta tuotetta. Tästä syystä energiantuotantosovellusten yhteydessä toteutettavalla hiilidioksidinpoistolla edellytetään huomattavasti kemianteollisuuden sovelluksia alhaisempia kustannuksia ja siten pesuliuosten ja -prosessien kehitykseen panostetaankin merkittäviä T&K-panostuksia ympäri maailmaa.

Hiilidioksidin poiston teknisiä kehityskohteita ovat mm. tehokkaiden ja erityisesti energiatehokkaiden liuottimien kehittäminen (absorptio-desorptio energiatehokkuus), reformoinnin kustannusten alentaminen (pre-combustion; IGCC ja maakaasukombi) sekä liuotinkustannusten alentaminen.

Taulukko 3.7. CCS-järjestelmän komponenttien kypsyys nykytilassa. Useimmille komponenteille on olemassa myös vielä varhaisemmassa kehitysvaiheessa olevia vaihtoehtoisia teknologioita. (IPCC 2005)

<i>CCS:n komponentti</i>	<i>CCS:n teknologia</i>	<i>Tutkimusvaihe</i>	<i>Demonstraatiovaihe</i>	<i>Taloudellisesti mahdollinen erityisissä olosuhteissa</i>	<i>Kypsä teknologiamarkkina</i>
Erotus	Polton jälkeinen			X	
	Ennen polttoa			X	
	Happipolttu		X		
	Teollisuuden erotustekniikat (mm. ammoniakki valmistus)				X
Kuljetus	Putkikuljetus				X
	Laivakuljetus			X	
Geologinen varasto	Öljyn tehostettu tuotanto				X
	Kaasu- ja öljykentät			X	
	Suolavesimuodostumat			X	
	Metaanin tehostettu tuotanto hiilikentästä		X		
Valtamerivarasto	Suora sijoitus	X			
	Neutralointi karbonaateilla	X			
Mineraalikarbonointi	Luonnon silikaattimineraalit	X			
	Jättemateriaalit		X		
CO ₂ :n käyttö teollisuudessa					X

Hiilidioksidin varastointia geologisiin muodostumiin tehdään koemielessä mm. Pohjanmerellä, Kanadassa ja Algeriassa. Sleipnerin öljykentällä Pohjanmerellä maakaasussa olevaa hiilidioksidia erotetaan asiakkaille toimitettavasta kaasusta ja erotettu hiilidioksidi pumpataan merenpohjan alla huokoisessa kalkkikivessä olevaan suolavesimuodostumaan. Weyburnin öljykentällä Kanadassa hiilidioksidia johdetaan USA:sta tulevalla putkella öljykenttään öljyn tuotannon lisäämiseksi ja samalla tutkitaan hiilidioksidin varastoitumista kenttään. In-Salahin kaasukentällä Algeriassa on aloitettu Weyburniä vastaava toiminta.

Euroopassa kaavaillaan ohjelmaa, jossa rakennetaan 12 demonstraatiolaitosta, joissa on hiilidioksidin talteenotto. Samoin Yhdysvalloissa on käynnistymässä useita hankkeita. Valtaosassa eurooppalaisista CCS-demonstraatiohankkeista hiilidioksidin loppusijoituspaikaksi on suunniteltu Pohjanmeren maakaasu- ja öljykenttiä. Itse asiassa Pohjanmeren maakaasun- ja öljyntuotannon jatkuminen tulee jopa edellyttämään hiilidioksidin käyttöä, sillä alueen öljyntuotannon arvioidaan muuten laskevan. Hiilidioksidin injektion avulla voidaan tehostaa sekä kaasun että öljyn saantoa kentistä. EU on myös esittänyt ehdotusta, että pidemmällä aikavälillä kaikissa uusissa kivihiihivoimaloissa tulee olla hiilidioksidin erotuslaitos. Suomessa selvitetään CCS:n integrointia mm. Meri-Porin voimalaan.

Hiilidioksidia voidaan myös sitoa silikaattimineraaleihin, joita mm. Suomessa on runsaasti. Reakti nopeus on kuitenkin hidas, ja menetelmä on vasta tutkimusvaiheessa. Raudan valmistuksen kuonaa voidaan myös käyttää hiilidioksidin sitomiseen. Tämänkään teknologia ei ole vielä kaupallistumassa, ja kuonalla on jonkin verran myös muita, jo kaupallisia käyttökohteita.

Valtamereen varastoinnin tekninen kypsyys on selvästi heikompi kuin geologisiin muodostumiin tapahtuvan varastoinnin. Samoin on odotettavissa, että valtamerivaraston pysyvyys ei ole niin hyvä kuin geologisen varaston. Valtamereen tapahtuva varastointi myös alentaa veden pH:ta, millä voi olla haitallista vaikutusta eliöstöön. Lisäksi jätteiden sijoittamisesta mereen on tehty kansainvälisiä sopimuksia, joiden soveltuvuudesta hiilidioksidille ei ole täyttä yksimielisyyttä. Valtamereen tapahtuva varastointi on käytännössä lähes hylätty vaihtoehto.

Hiilidioksidin erotus kuluttaa suhteellisen paljon energiaa, mikä nostaa kustannuksia ja alentaa energiavaran käytön hyötysuhdetta. Toisin sanoen energiavaran kulutus kasvaa, jos pyritään tuottamaan hyötyenergiaa sama määrä kuin ennen erotuksen käyttöönottoa. Kehitteillä on kuitenkin useita erotusteknologioita, joissa pyritään energian kulutuksen huomattavaan alentamiseen.

IPCC (2005) arvioi hiilidioksidin erottamisen kustannuksiksi 15–75 USD/tCO₂erotettu. Monissa lähteissä esitetään kustannusten suurusluokaksi 40–50 €/tCO₂ (esim. Otter 2008). Eurooppalaisen CASTOR-projektin (CASTOR 2008) tavoitteena on laskea polton jälkeisen CO₂:n talteenoton kustannuksia tasolle 20–30 €/t. Hiilidioksidin siirron, geologisen varastoinnin ja varastojen monitoroinnin kustannukset olisivat 2–16 USD/tCO₂varastoitu (IPCC 2005), siis vain pienehkö osa erottamisen kustannuksista. Siirtokustannusten osuus kasvaa kuitenkin siirtomatkan kasvaessa ja myös mikäli varastointipaikka on merellä hankalissa olosuhteissa.

Hiilidioksidin varastoinnin turvallisuudesta ja pysyvyydestä keskustellaan paljon, ja CCS onkin osittain myös eettinen ongelma. Esimerkiksi kaasukenttiä pidetään kuitenkin hyvinä varastoina mm. siksi, että niistä poistettu kaasu on pysynyt kentissä tuhansia vuosia. Kaukana tulevaisuudessa, fossiilisten polttoaineiden käytön loppumisen jälkeen, pieniä hiilidioksidivuotoja voidaan pitää ilmastonmuutoksen kannalta merkityksettöminä, mutta ne voivat tuki olla ihmiselle ja eläimille alueellisesti vaarallisia.

3.7.5 CCS:n merkitys Suomelle

Suomen kannalta hiilidioksidin poistamisen ja varastoinnin eräänä suurimpana teknisenä ongelmana on varastointiin soveltuvien tunnistettujen varastointimahdollisuuksien puuttaminen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että erotettu hiilidioksidi jouduttaneen siirtämään varastoitavaksi Suomen rajojen ulkopuolelle, esimerkiksi Pohjanmerelle. Tämä lisähaaste aiheuttaa merkittäviä lisäkustannuksia hiilidioksidin talteenotolle ja varastoinnille Suomessa ja siten heikentää sen potentiaalia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Toisaalta hiilidioksidipäästörajoitusten kiristyessä päästöoikeuksien hinta kasvaa ja siten parantaa myös hiilidioksidin talteenoton edellytyksiä Suomessa. Myös tutkimukset CO₂:n varastoinnista kiinteisiin mineraaleihin (mineraalikarbonointi) saattavat joiltain osin mahdollistaa CO₂:n varastoimista Suomessa.

Suomeen voidaan tuoda myös sähköä (tai joskus ehkäpä vetyä), jonka tuottamisessa hiilidioksidi on erotettu ja varastoitu. Ensimmäiset CCS:n sovellukset Suomessa lienevät teollisuudessa, jossa savukaasun hiilidioksidipitoisuus on suuri ja erottaminen kuluttaa vähemmän energiaa, tai rannikon suurissa fossiilista polttoainetta käyttävissä voimalaitoksissa.

Kenties merkittävimmät hiilidioksidin erotukseen ja varastointiin liittyvät taloudelliset vaikutukset liittyvät voimalaitostekniikan rakentamiseen, jossa Suomessa toimivilla yrityksillä on maailmanlaajuisestikin hyvin merkittävä osa. Esimerkiksi happipoltolla voi tulevaisuudessa olla hyvinkin merkittävä rooli hiilidioksidipäästöjen rajoittamisessa, ja silloin suomalaiselle alan teollisuudelle avautuvat merkittävät vientinäkymät. Lisäksi suomalainen teknologiateollisuus voi valmistaa laitteita, jotka liittyvät hiilidioksidin erotukseen, kuljetukseen ja varastointiin tai niihin liittyviin laitoksiin. Suomessa on maailmanlaajuisesti merkittäviä energia- ja off-shore-teknologian laitteiden toimittajia.

3.7.6 CCS:n tulevaisuus

Jotta hiilidioksidin erotus ja varastointi myös käytännössä olisivat merkittävä taloudellinen vaihtoehto rajoittaa päästöjä, tarvitaan vielä runsaasti teknistä kehitystyötä ja suuren

mittakaavan pilottisovelluksia. Samoin tarvitaan tutkimusta hiilidioksidivarastojen käyttäytymisestä.

Mielenkiintoinen vaihtoehto on soveltaa CCS:ää biomassapolttoaineeseen (Bioenergy CCS, BECCS). Tällöin voidaan päästä elinkaarta ajatellen negatiivisiin päästöihin. Biomassan ilmakehästä sitomaa hiilidioksidia siirretään geologiseen varastoon, joka on eristettynä ilmakehästä. Sovellusta voi rajoittaa ainakin aluksi taloudellisuuden vaatima suuri laitoskoko. Jos käytetään sekapolttua ja CCS:ää, niin noin 10 %:n lisäys biopolttoainetta fossiiliseen polttoaineeseen tuottaa jo nolla-CO₂-päästöisen laitoksen.

Periaatteessa savukaasujen hiilidioksidia (ja laitoksen hukkalämpöä) voidaan käyttää myös levien tai muiden kasvien kasvun edistämiseen. Näin voidaan tuottaa ikään kuin uusi kierros energiaa jo kerran käytetyllä polttoaineella.

Teknisen ja luonnontieteellisen työn lisäksi tarvitaan päästöjen raportointia koskevien sääntöjen kehittämistä ja sopimuksia varastoihin liittyvästä vastuusta, etenkin kun varastot voivat olla useiden valtioiden tai kansainvälisten vesien alla.

Pyrittäessä syviin hiilidioksidipäästöjen leikkauksiin, kuten esimerkiksi EU:n vuotta 2050 koskevilla tavoitteilla, tarvitaan hyvin laajaa keinojen joukkoa päästöjen rajoittamiseen, jotta kustannukset pysyisivät kohtuullisina. Myös CCS on tällöin merkittävässä asemassa.

Useissa yhteyksissä, mm. IPCC:n vuoden 2007 raportissa, nähdään kuitenkin CCS eräänlaisena välivaiheen ratkaisuna, joka on laajassa käytössä ehkäpä puoli vuosisataa. Tämä johtuu pääosin siitä, että CCS:n hyötysuhde on nykyisten näkymien mukaan kokonaisuutena melko heikko ja energiavaroja tuhlaava. Myös hiilidioksidin varastoinnin pysyvyyteen, vastuisiin ja vakuuksiin saattaa jäädä ongelmia. VTT:ssä suoritetuissa järjestelmämallitarkasteluissa CCS:n osuus päästörajoituskeinona kasvaa vuosisadan puoliväliin saakka, jonka jälkeen sen merkitys voi pienentyä vähitellen muiden teknologioiden arvioidun voimakkaan kehityksen takia.

3.8 Polttokennot ja vetytalous

3.8.1 Johdanto

Tämän kappaleen tarkoitus on tarkastella, miten polttokennot ja vetytalous voisivat edistää hiilidioksidipäästöjen vähentämistä Suomen energiantuotannossa.

Tässä kappaleessa tullaan lähinnä keskittymään EU:n tilanteeseen ja EU:n vety- ja polttokennoyhteisön (European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform, HFP) tekemisiin skenaarioihin. Muutama vuosi sitten, kun EU perusti vety- ja polttokennoyhteisön, painopisteenä oli vetytalous, ja polttokennot olivat mukana toteuttamassa vedyn käyttöä sähkön tuotannossa. Vuonna 2006 alettiin perustaa Joint Technology Initiative (JTI) -järjestöä, ja teollisuus tuli vakavasti mukaan suunnittelemaan tekemisiään. Silloin todettiin, että vedyn käyttö sähkön tuotannossa on vielä kovin kaukana. Samalla ruvettiin ymmärtämään, että polttokennovoimalat käyttäisivät pääasiassa erilaisia fossiilisia ja bioperäisiä hiilivetyjä polttoaineena ja että vedyn laajamittainen käyttö tapahtuisi lähinnä liikenteessä. Siten polttokennot ohittivat vetyteknologian tärkeydessä ja tutkimusrahoituksessa. Energian kannalta JTI:n organisaatiossa suurimmat varat on varattu polttokennoautojen ja siihen liittyvän polttoaineinfrastruktuurin kehittämiseen sekä hajautettuun sähkön ja lämmön tuotantoon käyttäen lähinnä korkealämpötilapolttokennoja.

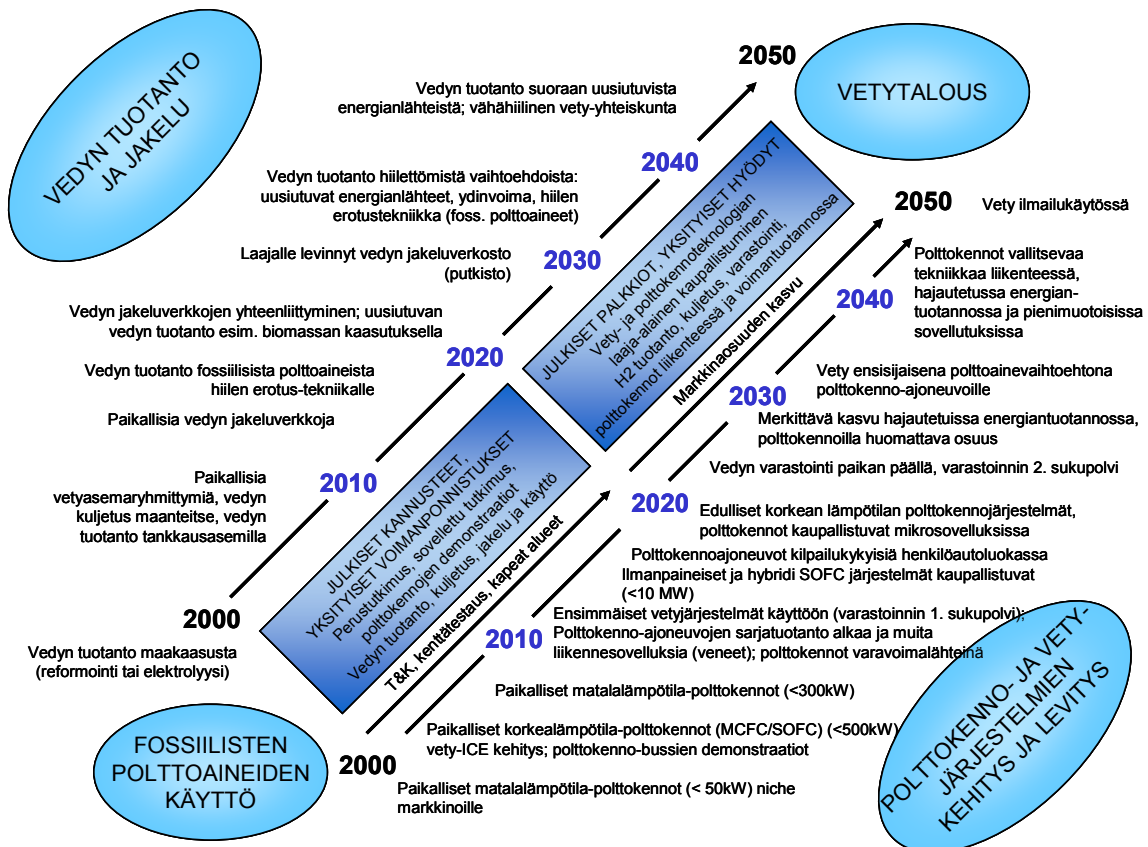
JTI:lle on FP7-budjetissa varattu EU:n tutkimus- ja demonstraatorahoitusta yhteensä 450 M€. Tästä n. 160 M€ on suunniteltu käytettäväksi liikennesovelluksiin (Hydrogen vehicles and refuelling stations), 175 M€ hajautetun sähköntuotannon sovelluksiin (Fuel Cells for CHP and Power Generation), ja vain 35 M€ vedyn valmistuksen ja varastointiin (Sustainable hydrogen production and supply). On tietysti huomattava, että varastointi autoissa ja jakeluteknologia rahoitetaan liikennesovellusten budjetista. Tämän EU-rahoituksen lisäksi yritykset ovat sitoutuneita osallistumaan yhteisiin projekteihin samalla summalla. Itse asiassa JTI:hin kuuluvat 50 yritystä tekivät v. 2006 yhteisen julki- lausuman, jossa ne sitoutuivat 10 vuoden aikana käyttämään yhteensä 5 miljardia euroa vety- ja polttokennotutkimukseen.

3.8.2 Polttokenno- ja vetyteknologian pääsy markkinoille

Kysymys kuuluu, mitä panostuksilla on luvattu saada aikaan. Useat työryhmät istuivat tekemässä suunnitelmia ja tavoitteita vuoden 2020 osalta (HFP 2005a). Tämä ns. ”snapshot” 2020 on sen jälkeen ollut lukkoon lyöty, ja siihen viitataan kaikissa suunnitelmissa (taulukko 3.8). Snapshot sisältää ennusteet myös kannettaville sovelluksille, mutta koska ne eivät liity energian tuotantoon, ne on jätetty pois tästä raportista. Tämän lisäksi yhteisö teki jo alkuvaiheessa ns. tiekartan vuoteen 2050 saakka. Tämä on esitetty kuvassa 3.11. Kuvassa ei ole esitetty lukuarvoja, mutta v. 2050 oletetaan merkittävän osan liikenteestä ja sähköntuotannosta perustuvan polttokennoihin.

Taulukko 3.8. EU vety- ja polttokennoyhteisön skenaarion mukainen tuotanto ja hinnat polttokennovoimalaitoksille ja polttokennoautoille (HFP 2005a).

	Kiinteät polttokennot Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (CHP)	Polttokennoautot
<i>EU</i> Vety/ polttokennoyksiköiden myynti vuodessa, ennuste v. 2020	100 000–200 000 vuodessa (2–4 GW _e)	0,4 miljoonasta 1,8 miljoonaan
<i>EU</i> myynti yhteensä vuoteen 2020	400 000–800 000 (8–16 GW _e)	1–5 miljoonaa
<i>EU</i> Odotettu markkinatilanne v. 2020	Kasvussa	Massatuotantovaihe saavutettu
Polttokennojärjestelmien keskimääräinen teho	< 100 kW (mikro-HP) > 100 kW (teollisuus-CHP)	80 kW
Polttokennojärjestelmien tavoiteltu kustannus	2 000 €/kW (mikro) 1 000–1 500 €/kW (teollisuus-CHP)	< 100 €/kW (150 000:lle yksikölle vuodessa)



Kuva 3.11. EU:n tiekartta vetytalouteen.

On huomioitava, että tekeillä olevan EU:n strategisen energiateknologisen suunnitelman eli SET Plan -suunnitelman tavoitteissa on maininnat polttokennoista. Vuoden 2020 osalta tavoitteissa huomioidaan, että Euroopassa on yhtenäinen sähköverkko, joka pystyy vastaanottamaan suuret määrät (massive) hajautettua sähköntuotantoa, mukaan lukien polttokennot. Vuoden 2050 tasolla sanotaan, että tavoitteena on luoda olosuhteet, joissa mahdollistetaan polttokennoautojen kaupallistuminen. Edellinen viittaa siihen, että todella odotetaan polttokennovoimaloiden kaupallistuvan 2020 mennessä. Sitä vastoin jälkimmäinen on muutos, sillä tähän saakka on lähdetty siitä, että polttokennojen kaupallinen tuotanto alkaa jo v. 2020.

Vuoden 2020 suunnitelmissa on siis ajateltu, että Euroopassa on asennettuna 8–16 GW polttokennosähkötehoa. Vuonna 2020 tämä olisi vain 3 % sähköntuotannosta. Siksi sen merkitys olisi vähäinen. HFP Implementation Plan -suunnitelmassa (HFP 2007) ennustettiin, että v. 2015 määrä olisi 1 GW. Tässä siis oletetaan, että kasvu olisi tiekartan mukaisesti eksponentiaalista, ja osuus sähköntuotannosta voisi olla jo merkittävä v. 2050. Voidaan vain todeta, että potentiaalia arvioidaan olevan. Toinen asia on sitten, mikä polttokennovoimalaitoksen etu suhteessa muuhun voimantuotantoon olisi. Siihen palataan hieman myöhemmin tässä osiossa.

Tähän saakka EU:ssa on ajateltu, että vedyn käyttö liikennepolttoaineena olisi ehkä merkittävimpiä toimenpiteitä CO₂-päästöjen vähentämiseksi. Aikaisemmin on ennustettu, että polttokennoautojen osuus Euroopan autoliikenteestä olisi 1–5 % vuonna 2020 (EU Hynet 2004). Myös tämä osuus on melko merkityksetön. Sitä vastoin ajateltiin, että v. 2050 ne voisivat jo olla dominoivia. SET Plan -suunnitelman tavoite viittaisi siihen, että kaupallistuminen viivästyisi. Koska snapshot-ennusteita ei ole ainakaan virallisesti kumottu ja IP suunnitelmassa v. 2007 (HFP 2007) asetettiin tavoitteeksi massatuotannon alkaminen v. 2020, voidaan vielä lähteä siitä, että polttokennoautojen osuus vuonna 2050 saattaa olla merkittävä. Mikä hyöty tästä olisi hiilidioksidipäästöjen kannalta? Siitä hieman myöhemmin.

3.8.3 Polttokenno- ja vetyteknologian vaikutukset

Edellisessä kappaleessa kuvattiin nykyistä tietämystä polttokennojen ja vetyteknologian käyttöönotosta ja sen laajuudesta vuoden 2020 perspektiivistä. Seuraavassa käsitellään lyhyesti, miten polttokenno- ja vetytekniikan käyttöönotto voi vaikuttaa hiilidioksidipäästöihin.

Kun EU:n vety- ja polttokennoyhteisön strategista tutkimusagendaa kirjoitettiin vuonna 2005 (HFP 2005b), siinä todettiin, ettei sähkön tuottaminen vedystä ole kannattavaa, vaan sähkö tuotetaan suoraan muista polttoaineista polttokennoilla. Vedyn tekeminen

sähköntuotantotarkoituksiin on kannattavaa ainoastaan silloin, kun sitä pitää varastoida, kuten liikenteessä, tai mahdollisesti ns. peak shaving -tilanteessa, jos sähkön hinta on lähes nolla. Tässä tarkastelussa lähdetään siksi siitä, että polttokennot käyttävät maakaasua tai biokaasua sähköntuotannossa ja käyttävät vetyä ainoastaan liikennesovelluksissa.

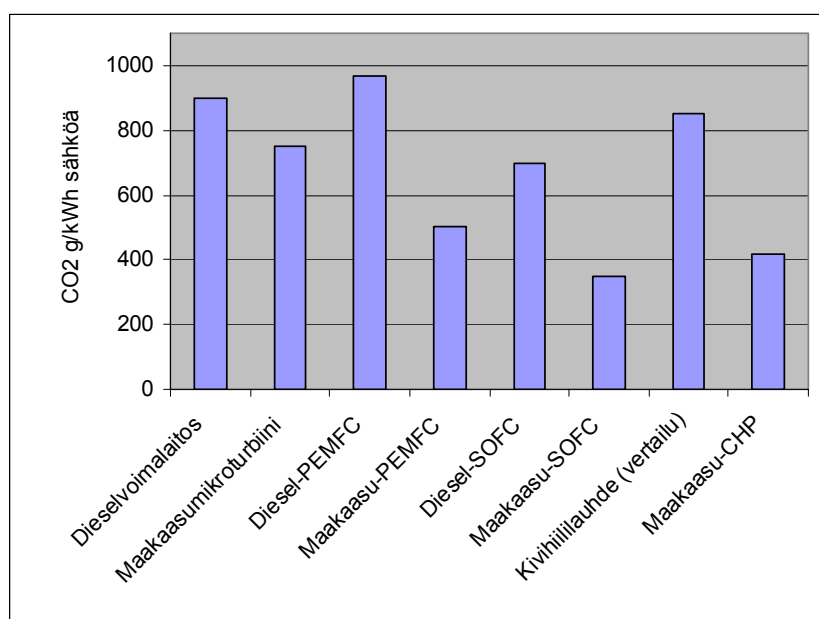
Korkealämpötilapolttokennojen (SOFC, MCFC) ominaisuudet sähköntuotannossa ovat seuraavat.

- polttokennot eivät päästä ilmaan typen- eikä rikin oksideja eivätkä hiukkasia
- polttoaineena voidaan käyttää lähes kaikkia hiilivetyjä, joko sellaisenaan tai kaasutuksen kautta
- polttokennoja käytetään yhteistuotannossa (CHP)
- sähköhyötysuhde maakaasulle voi olla 50–60 %, ja kokonaishyötysuhde 90 %.

Suunnitteilla on hybridilaitteita, joiden sähköhyötysuhde saattaa nousta 70 %:iin.

Polttokenno on siis hyvin puhdas sähköntuotannossa. Kun sähköntuotannossa käytetään fossiilisia polttoaineita, CO₂-päästöt riippuvat ainoastaan hyötysuhteesta. Polttokennojen korkea hyötysuhde on siis tässä selvä etu. Toinen etu on se, että polttokennot voivat hyödyntää myös laimeita kaasuja. Siten polttokennolla voidaan tehdä sähköä hyvällä hyötysuhteella kaasumaisista hiilivedyistä, vaikka niissä olisikin korkeat pitoisuudet typpeä tai hiilidioksidia. Siksi erilaiset biokaasut, kaatopaikkakaasut, tai fermentaatiotuotteet vedenpuhdistuslaitoksista jne. käyvät hyvin polttoaineeksi. Samoin sopivat biomassan kaasutuskaasut polttoaineeksi.

Käytettäessä fossiilisia polttoaineita sähkön tuotannossa etenkin korkealämpötilapolttokennojen (Kiinteäoksidipolttokenno SOFC, sulakarbonaattipolttokenno MCFC) edullisuus näkyy oheisessa taulukossa. Kuvassa 3.12 on verrattu eri voimalaitostyyppien ominaishiilidioksidipäästöjä toisiinsa. Mukana on sekä tyypillisiä hajautetun sähköntuotannon laitoksia että keskitettyjä CHP-laitoksia. Tässä on vertailtu vain sähköntuotannon päästöjä. SOFC-polttokennon sähköhyötysuhteeksi on laitettu 60 % ja maakaasuvoimalaitoksen 55 %. Vertailu on suuruusluokaltaan oikea, koska kaikkien laitosten käyttö yhdistettyyn tuotantoon on mahdollista, ja niiden kokonaishyötysuhteet ovat välillä 80–90 %. Rakennusaste kyllä vaihtelee, mutta useimmissa maissa sähkön arvo on suurempi kuin lämmön. Tämän mukaan suuri maakaasua polttava laitos ja maakaasua käyttävä SOFC-voimalaitos ovat päästöjen suhteen vertailukelpoisia. Kumpi on parempi, riippuu siitä, miten SOFC:n investointikustannukset kehittyvät tulevina vuosina ja halutaanko rakentaa pienimuotoista hajautettua tuotantoa. Verrattuna tämän hetkiseen sähköntuotantoon polttokennoteknologialla on ilman muuta suuri potentiaali vähentää hiilidioksidipäästöjä.

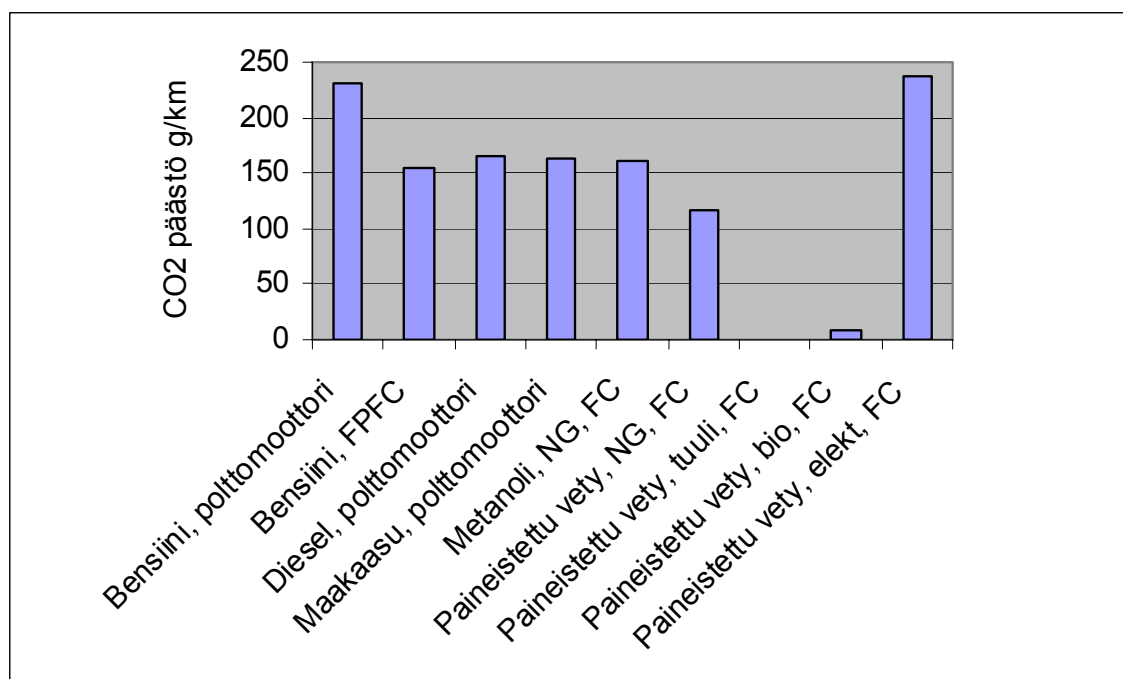


Kuva 3.12. Eri voimalaitostyyppien ominaishiilidioksidipäästöt. Tiedot perustuvat Fuel Cell Market Prospects and Intervention Strategies -raporttiin (UNEP 2002) ja Helsingin Energialta saatuihin tietoihin.

Mikäli joskus tulevaisuudessa todella pystytään valmistamaan hybridilaitoksia, joiden sähköhyötysuhteeksi on arvioitu jopa yli 70 %, tilanne muuttuu vielä edullisemmaksi polttokennoille.

Kuten jo aikaisemmin mainittiin, ei vedyn käyttö sähkön tuotannossa tunnu järkevältä kuin aivan erityisissä olosuhteissa. Ei kuitenkaan ole aivan mahdotonta, että vedyn käyttö sähkön varastointiin voisi olla kannattavaa esim. tuulisähköön tai ydinvoimaan liittyen.

Pääasiassa on kuitenkin ajateltu, että vetyä tarvittaisiin liikenteessä. Monista syistä johtuen sähkön käyttö liikenteessä olisi edullista. Tämä johtuu sekä ympäristö-, kustannus- että teknisistä syistä. Viime aikoina ladattavat hybridit eli ns. plug-in-hybriditekniikka on innostuttanut maailmaa. Sähköauto voidaan tulevaisuudessa toteuttaa joko puhtaana sähköautona, polttokennoautona tai plug-in-polttokennohybridinä. Vety polttoaineena on tietenkin hankala lähinnä siksi, että sen varastointi on tehotonta ja vaatii siksi suuren tilavuuden. Vedyn edullisuus hiilidioksidipäästöjen kannalta riippuu sen valmistusmenetelmästä. Ns. well-to-wheel-laskelma osoittaa koko kierron vaikutuksen hiilidioksidipäästöihin. Tässä huomioidaan valmistus, varastointi, kuljetus ja käyttö. Viimeksi mainittu on erityisen edullista polttokennoille johtuen niiden hyvästä hyötysuhteesta käytettäessä vetyä. PEM-polttokennon hyötysuhde voi olla 40–60 %. Tässä se voittaa polttomoottorit ja hybridit hyvällä marginaalilla. Oheisessa kuvassa 3.13 on esitetty eri ajoneuvotyyppien ominaishiilidioksidipäästöt.



Kuva 3.13. Eri ajoneuvojen ominaishiilidioksidipäästöt koko polttoaineketju huomioiden. FC = polttokenno, FP = polttoaineen prosessori, NG = tehty maakaasusta, bio = tehty biomassasta, elekt = elektrolysoitu EU:n keskimääräistä sähköseosta hyväksikäyttäen (GM 2002).

Ydinvoimalla tai uusiutuvalla sähköllä tai biomassasta tehdyllä vedyllä käytettynä polttokennoauton hiilidioksidipäästöt ovat lähes nolla. Myös maakaasusta tehdyllä vedyllä päästään vielä polttomoottoria vähäisempiin hiilidioksidipäästöihin (GM 2002).

Lähdeviitteet ja lisätietoja

Boyle et al. 2004. Renewable Energy – Power for a sustainable future. Oxford University Press.

CASTOR 2008. An Innovative European Integrated Project: CASTOR- CO₂ From Capture to Storage. <https://www.co2castor.com/>.

EU HyNet 2004. EU Hynet Roadmap, Scenarios for a hydrogen vehicle build-up in Europe. <https://www.hfpeurope.org/>.

Eur'Observ'ER 2007a. Photovoltaic Energy Barometer, huhtikuu 2007. http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro172.pdf.

Eur'Observ'ER 2007b. Solar Thermal Barometer; kesäkuu 2007. http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro180.pdf.

GIF 2002. Technology roadmap for generation IV nuclear energy systems. US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum (GIF), December. http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf.

GM 2002. Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study. L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, Germany. 27th September 2002.

Hakkila, P. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Loppuraportti. Teknologiaohjelmaraportti 5/2004. Helsinki: Tekes. 135 s.

Heikkinen 2008. Rakennuspalvelu P&P Heikkinen. Toteutettujen aurinkojärjestelmien kustannukset.

Helynen, S., Flyktman, M., Asikainen, A. & Laitila, J. 2007 Metsätalouteen ja metsäteollisuuteen perustuvan energialiiketoiminnan mahdollisuudet. VTT Tiedotteita 2397. Espoo 2007. 66 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2397.pdf>.

HFP 2005a. Deployment Strategy. Euroopan vety- ja polttokennoyhteisön (HFP, European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform) julkaisu. <https://www.hfpeurope.org/>.

HFP 2005b., Strategic Research Agenda. Euroopan vety- ja polttokennoyhteisön (HFP, European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform) julkaisu, <https://www.hfpeurope.org/>.

HFP 2007. Implementation Plan – Status 2006. Euroopan vety- ja polttokennoyhteisön (HFP, European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform) julkaisu, <https://www.hfpeurope.org/>.

IEA 2006. Energy Technology Perspectives 2006. Scenarios & Strategies to 2050. IEA, Paris, France.

IEA-OES 2003. IEA Ocean Energy Systems (IEA-OES). Status and Research and Development Priorities, Wave and Marine Current Energy. http://www.iea-oceans.org/_fich/6/IEA-OES_Wave_and_Tidal_report.pdf.

IEA-OES 2006. IEA Ocean Energy Systems (IEA-OES). Review and analysis of ocean energy systems development and supporting policies. http://www.iea-oceans.org/_fich/6/Review_Policies_on_OES_2.pdf.

IEA-PVSP 2008. 1 MW decentralized and building integrated PV system in a new housing area of Amersfoort, Netherlands. <http://www.iea-pvps.org/cases/index.htm>.

Ilmatieteen laitos 2008. Auringonpaistetilastoja ja -ennätyksiä, Internet-sivut. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_9.html#6.

IPCC 2005. Carbon Dioxide Capture and Storage, Special Report. Cambridge University Press, Great Britain.

MMM 2008. Kansallinen metsäohjelma 2015. Maa- ja metsätalousministeriö (painossa).

Moor et al. 2003. Experience curve approach for more effective policy instruments 3rd World conference on photovoltaic energy conversion.

<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/9136/28988/01305130.pdf>.

OECD 2005. Projected costs of generating electricity – 2005 update. Joint Report, Nuclear Energy Agency and International Energy Agency, OECD, Paris.

OECD 2006a. Uranium 2005: resources, production and demand. Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD/NEA. 388 s. ISBN 92-64-02425-5.

OECD 2006b. Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management, OECD/NEA. 248 s. ISBN 92-64-02485-9.

Otter, N. 2008. The Pathway to Zero Emission Power with Fossil Fuels – a European Perspective. Workshop on CO₂ Capture Utilisation and Storage. Feb 5, 2008, Espoo, Tekes ClimBus.

Pelamis 2008. Pelamis Wave Power, Internet-sivut. <http://www.pelamiswave.com/>.

Powerbuoy 2008. Ocean Power Technologies, Autonomous Power Systems. <http://www.oceanpowertechnologies.com/power.htm>.

Pöyry 2007. Tuulivoimatavoitteiden toteutumisenäkymät Suomessa – Päivitetty tilannekatsaus 2007. Selvitys. <http://www.tem.fi/files/17697/Tuulivoima-loppuraportti.pdf>.

Sandia 2008. Evaluation of Performance, Cost and Reliability in Fielded Photovoltaic (PV) System. <http://www.sandia.gov/SAI/Reliabilitylifecycle.htm>.

SNETP 2007. Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – Vision Report, EUR 22842. 36 s. http://www.snetp.eu/home/liblocal/docs/sne-tp_vision_report_eur22842_en.pdf.

UNEP 2002. Fuel Cell Market Prospects and Intervention Strategies, Final Report, Imperial College Centre for Energy Policy and Technology, (ICCEPT), United Nations Environment Programme (UNEP), January 2002.

UNEP/GRID-Arendal 2008. Solar insolation, UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. <http://maps.grida.no/go/graphic/solar-insolation>.

VTT 2004. Energia Suomessa – Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset, Edita, Helsinki, 2004. 396 s.

VTT 2007. Energy Use, Visions and Technology Opportunities in Finland. Edita Prima. 234 s. ISBN 978-951-37-4742-8.

VTT 2008. VTT, Internet-sivut, Energia/Tuulivoima/Suomen tuulivoimatilastot. <http://www.vtt.fi>.

4. Teollisuusprosessit ja tehostamismahdollisuudet

4.1 Energiankäyttö teollisuudessa

Teollisuus käytti vuonna 2006 yhteensä 568 490 TJ energiaa sähkönä, kaukolämpönä ja suorana polttoaineena (Tilastokeskus 2007).

Sähköä käytettiin vuonna 2007 Suomessa 90,3 TWh, teollisuuden ja rakentamisen osuuden ollessa 47,9 TWh (53 %) (Energieateollisuus 2008). Vuonna 2006 teollisuuden sähkön kokonaiskulutus (48 TWh) jakautui eri teollisuuden haaroille seuraavasti (EK ja Energieateollisuus 2007):

- 59 % metsäteollisuus
- 17 % metalliteollisuus
- 14 % kemianteollisuus
- 12 % muut teollisuudenalat ja rakennustoiminta.

EK:n ja Energieateollisuus ry:n (2007) laatiman ennusteen mukaan vuonna 2020 teollisuuden arvioidaan kuluttavan sähköä noin 20 % ja vuonna 2030 noin 30 % enemmän kuin vuonna 2006. Nopeinta sähkönkulutuksen kasvu vuoteen 2020 olisi metalliteollisuudessa, keskimääräisen vuosikasvun ollessa yli 2 %. Vuosina 2020–2030 vuosikasvu hidastuisi kuitenkin hieman yli 0,5 %.

Uusissa elinkeinoelämän energiatehokkuussopimuksissa tavoitteena on energiamääränä (GWh) 9 %:n lasku energian loppukäytössä jaksolla 2008–2016. Tehostamistoimina hyväksytään myös vuodesta 1995 lähtien toteutettuja energiansäästötoimia, jos säästövaikutus on edelleen voimassa. Jos yrityksen liiketoiminta kasvaa, ei jakson lopun energiakäytön kuitenkaan tarvitse olla määrällisesti 9 % alhaisempi kuin vertailuajankohdanta. Myös laskennalliset säästöt esim. tulevan kulutuksen estämisestä hyväksytään, jos ne olisivat aiheutuneet ilman toimenpiteitä (EK 2007).

Teollisuussektorin energiansäästö- ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämismahdollisuuksia pitkälle tulevaisuuteen pohdittaessa on tärkeätä huomata, että perinteisten teollisuusprosessien teknisten tehostamismahdollisuuksien lisäksi suuri merkitys on energiantensiivisten tuotteiden kysynnän kehityksellä. Esimerkiksi eri paperilaatujen valmistuksen vaatimat energiamäärät poikkeavat toisistaan suuresti. Päästöoikeuksien ja energian hintakehitys vaikuttavat energiantensiivisten tuotteiden hintoihin ja sitä kautta niiden käyttöön, mutta myös kuluttajien valistuneisuudella on merkitystä. Tämän luvun lähestymistapa on raportin rajauksen vuoksi teknologinen.

4.2 Yleiset tehostamismahdollisuudet

Moottorit, pumput, puhaltimet ja lämmönsiirtimet kuluttavat itse tai niiden kautta kulkee suuri osuus teollisuuden käyttämästä energiasta. Samoin valaistus on sekin huomion arvoinen sähkön kuluttaja.

Oikea laitteiden valinta kuhunkin kyseessä olevaan sovellukseen ja oikea mitoitus ovat tärkeitä niin energiansäästön kuin ylläpitokustannustenkin kannalta. Laadukkaammat ja hyötysuhteeltaan tehokkaammat laitteet maksavat hieman enemmän, mutta vastaavasti ylläpidossa ja energiankulutuksessa voidaan saada huomattavia säästöjä aikaan. Nämä säästömahdollisuudet kannattaa laskea huolellisesti ennen investoimista halvempaan, halvemmin materiaalein toteutettuun ja huonomman hyötysuhteen omaavaan laitteeseen.

Laitteiden oikein suoritettu ylläpito huoltoineen ja puhdistuksineen tuo myös säästöjä vähentyneiden vikaantumisten ja laiterikkojen sekä pienentyneiden energiahäviöiden muodossa.

4.2.1 Moottorikäytöt

Moottorikäytöt voivat olla suoria, jolloin moottori on suoraan kuormassa kiinni, tai välissä voi olla vaihde ja/tai hihna. Suoralla käytöllä voidaan säästää vaihteen ja hihnan aiheuttamissa häviöissä. Moottorin nopeuden ohjaaminen **taajuusmuuttajalla** (VSD) mahdollistaa nopeudenvaihtelut säädön perustana olevien suureiden perusteella. Esimerkiksi prosesseissa, joissa pumppausmäärät vaihtelevat, on mahdollista ajaa käyttöä aina optimaalisella nopeudella. Näin tehden voidaan periaatteessa luopua lähes kokonaan esimerkiksi perinteisistä säätöventtiileistä, jolloin säästetään pumppausenergiassa. Suora käyttö sisältää vähemmän mekaanisesti kuluvia osia, jolloin säästetään ylläpitokustannuksissa, ja prosessia on helpompi ohjata esimerkiksi ylösajo- ja alasajotilanteissa. On arvioitu, että maailmanlaajuisesti vain pieni osa potentiaalisista taajuusmuuttajainstallaatioista olisi toteutettu, joten tehostusmahdollisuuspotentiaalia on vielä runsaasti jäljellä (VTT 2007). Taajuusmuuttajan hankintapäätökseen vaikuttavat kuorman säätötarve ja käyttöaika. Taajuusmuuttajan hyötysuhteet ovat nykyään 98 %:n tasolla.

Hitaasti pyörivissä sovelluksissa oikosulkumoottorin suoraan käyttäminen ei ole paras valinta, sillä moottorin hyötysuhde pienenee huomattavasti nopeuden hidastuessa. Perinteinen ratkaisu on ollut asentaa oikosulkumoottori yhdessä vaihteen kanssa tai käyttää tahtimoottoria. Kestomagneettikäyttö on uusi sovellus, jolla voidaan välttää vaihteistot ja hihnat ja niiden aiheuttamat häviöt. Asennuskohteita ovat esimerkiksi paperikoneiden käytöt.

4.2.2 Moottorit

Oikosulkumoottori (synonyymejä epätahtimoottori, induktiomoottori) on yleisin teollisuudessa käytössä olevista moottorityypeistä. Se on parhaimmillaan suuremmilla nopeuksilla. Moottorit, nimellistehoiltaan 1,1–90 kW, on luokiteltu Euroopan komission ja sähkömoottoriteollisuuden toimesta kolmeen eri hyötysuhdeluokkaan: EFF1, EFF2 ja EFF3. Parhain hyötysuhde on EFF1-luokassa ja alhaisin EFF3-luokan moottoreilla.

Korkeamman hyötysuhteen omaavat moottorit ovat investointikustannuksiltaan jonkin verran kalliimpia, mutta lisäinvestoinnin takaisinmaksuaikaa lyhentävät kallistuva sähköenergia ja osaltaan myös pienentynyt moottorin jäähdytystarve vähentyneiden lämpöhäviöiden myötä. Moottorin valintaan voidaan edelleen panostaa laskemalla todelliset käyttöikäkustannukset moottoreille ennen hankintaa. On arvioitu, että noin 1 %:n säästöt sähköenergiassa on mahdollista saavuttaa, jos alhaisimman hyötysuhteen omaavat moottorit korvattaisiin korkean hyötysuhteen moottoreilla (VTT 2007).

4.2.3 Prosessikuormat

Moottoreilla, vaihteistoilla, hihnoilla ja taajuusmuuttajilla ajetaan kuormaa, kuten pumppuja, puhaltimia ja kompressoreita, ja ne muodostavat yhdessä moottorikäytön.

Pumppaukset ovat merkittävä sähkön kuluttaja maailmassa (melkein 20 %), ja vielä suurempi kuluttaja teollisuudessa. Pumppauksista aiheutuu noin 30 % Suomen metsäteollisuuden sähkönkulutuksesta. Pumppausjärjestelmiin on perinteisesti liittynyt taipumus ylimitoitukseen: joko varaudutaan suurempaan pumppaustarpeeseen tulevaisuudessa tai ollaan epävarmoja todellisesta pumppaustarpeesta.

Pumput toimivat monesti sivussa optimialueeltaan. Osa häviöistä on voitettavissa käyttämällä taajuusmuuttajaa ja soveltuvaa moottoria ohjaamaan prosessin virtaukset oikeiksi, ilman että virtausta tarvitsee rajoittaa säätöventtiileillä. Itse pumppukin tulisi mitoittaa oikein kyseeseen sovellukseen, pumpun ominaiskäyriin perustuen. Pumpun juoksupyörä voidaan myös vaihtaa.

Puhaltimien ja kompressorien kohdalla tilanne on hyvin samankaltainen kuin pumpuilla. Ylimitoitusta on mahdollista korjata mitoittamalla puhaltimen tai kompressorin juoksu-siipi uudestaan ja käyttämällä taajuusmuuttajia ohjaamaan kuormaa.

4.2.4 Lämmönsiirtimet ja lämpöpumput

Prosesseissa on taloudellisesti kannattavimmat lämmöntalteenottokohteet pitkälle jo huomioitu ja hyödynnetty. Kuitenkin esimerkiksi energiansäästöopimukseen liittyvät energia-auditoinnit sekä prosessi-integraatioanalyysit paljastavat yhä uusia tehostamismahdollisuuksia ja keinoja vähentää prosessien lämmitys- ja jäähdytystarpeita. Polttoainneiden ja sähkön kallistuessa säästöpotentiaali lämmön talteenotossa suurenee, ja taloudellisesti kannattavan lämmöntalteenoton potentiaali kasvaa.

Lämmönsiirtimien operoinnin kannalta lämmönsiirtopinta-alojen puhtaus on oleellinen asia. Mahdolliset kerrostumat huonontavat nopeasti lämmönsiirtimien tehokkuutta. Edelleen tehostettu lämmönsiirtimien kunnon seuranta lisää energiasäästöjä.

Teollisessa mittakaavassa lämpöpumput tulevat löytämään uusia sovelluksia säästämällä edelleen energiaa. Matalammassa lämpötilassa olevaa lämpöenergiaa voidaan pumpata ylemmälle tasolle pienentämällä samalla jäähdytystarpeita ja vähentämällä lämmön tarvetta prosessiin. Sovellukset tarvitsevat sähköä toimiakseen, sitä enemmän mitä korkeammalle lämpötilatasolle lämpöä halutaan nostaa. Niiden kannattavuus riippuukin korvattavan lämpöenergian hinnasta, mahdollisista säästöistä jäähdytyksessä, sähkön tarpeesta ja hinnasta, kylmäaineesta ja itse laitteen investointikustannuksesta.

4.2.5 Valaistus

Teollisuuden valaistuksen sähkönkulutus on noin 1,5 TWh; tulevaisuuden säästöpotentiaali on luokkaa 0,4 TWh.

Valaistuksessa voidaan säästää sähköä panostamalla suunnitteluun ja tilan tai alueen valaistustarpeiden selvittämiseen. Valo tulee kohdentaa oikeaan paikkaan tarpeen kanssa oikea-aikaisesti riittävällä voimakkuudella. Tätä edesauttavat ohjausmahdollisuudet esimerkiksi liikkeen tai päivänvalon mukaan. Lamppujen ja liitäntälaitteiden tulee olla energia- ja tehokkaita ja kestäviä. Itse valaistusjärjestelmän valinnassa on pyrittävä mahdollisimman hyvän hyötysuhteen omaavaan ratkaisuun tarpeeseen soveltuvista vaihtoehdoista.

4.3 Metsäteollisuus

Metsäteollisuuden tuotteet valmistetaan lähes kokonaan uusiutuvista raaka-aineista. Metsä, ja siitä valmistetut tuotteet, toimivat ilmasta otetun hiilen varastoina ja ovat edistämässä kestävästä kehityksestä. Metsäteollisuus käyttää tällä hetkellä 59 % teollisuuden kuluttamasta sähköstä Suomessa (Tilastokeskus 2007; sahatöiden mukana). Tämä on

noin 30 % koko Suomen kuluttamasta sähköstä. Ensisijainen motivaatio Suomessa toimivalla metsäteollisuudella on pyrkiä hyödyntämään käytettävissä oleva metsävaranto kestävästi ja mahdollisimman kannattavasti ja pyrkiä kannattavaan tuotantoon Suomen rajojen sisäpuolella.

Vanhoissa teollisuusmaissa on tapahtumassa käänne paperin kulutuksessa. USA:n sanomalehtipaperin kulutus on laskenut henkeä kohti mitattuna vuoden 1947 tasolle ja kulutus on supistunut 40 % huippuvuodesta 1987. Samoin toimisto- ja aikakauslehtipaperien kysyntä on jo lähtenyt laskuun. Sama trendi on nähtävissä viiveellä myös muissa vanhoissa teollisuusmaissa. Aiemmat kasvuarviot graafisen paperin ja pakkauspaperien kehitysnäkymistä Suomen kannalta tärkeässä Länsi-Euroopassa eivät välttämättä toteudu: päällystetty aikakauslehtipaperi vuodessa 1,3 %, päällystetty hienopaperi 1 %, päällystämätön hienopaperi 0,7 % ja sanomalehti 0,2 % (Hetemäki et al. 2006). Kysynnän laskun takana ovat tieto- ja viestintäteknologian (ICT) sovellukset (mm. sähköinen media ja internet), joiden kehitysvauhti on ollut huima, ja tulee jatkumaan erikoisesti mobiili- puolella. Paperin kokonaiskysyntä maailmalla jatkaa kuitenkin edelleen kasvuaan, veturina uudet kehittyvät markkinat (mm. Kiina, Intia, Venäjä). Voimakas kysynnän kasvu jatkunee näillä alueilla vielä vuosikymmenen ajan (Hetemäki 2008).

Vielä muutamia vuosia sitten uskottiin vahvasti mm. että puupitoisten päällystettyjen paperien tuotanto ja kysyntä jatkavat vahvaa kasvuaan. Todellisuudessa niiden hinnat ovat laskeneet, ja samalla tuottomarginaali on kaventunut. Mekaanisen massan ja eri paperilaatujen ominaisenergiankulutuksen uskottiin edelleen nousevan yhä lisääntyvien laatuvaatimusten johdosta. Energian hintakehitys ja kuluttajien kasvava tietoisuus voivat mahdollisesti kääntää tätä kehitystä. Paperituotteet kehittyvät ohuemmiksi ja kuluttavat näin vähemmän resursseja tuotteen funktionaalisuuden säilyessä ennallaan, samalla ne vähentävät myös energiankulutusta. Kemiallisen trooppisen kuitumassan tuonti saattaa tulevaisuudessa osin korvata mekaanista massaa kun energian hinta edelleen nousee. Tämä vähentää metsäteollisuuden energian käyttöä.

Kehittyvät taloudet kilpailevat kasvavilla markkinoilla edullisilla kustannuksillaan ja alan osaaminen, huipputeknologia ja innovaatiot ovat kehittyvissä talouksissa vahvistumassa nopeasti. Aasiassa ja Itä-Euroopassa rakennetaan uutta tehokasta ja kustannuksiltaan edullista tuotantoa. Tuotteilta edellytetään uusia ominaisuuksia ja entistä edullisempää hintaa, ja kuluttajat asettavat yhä suurempia vaatimuksia valmistajille. Globaalin metsäteollisuuden vahvin kasvu tulee tapahtumaan kasvavilla markkinoilla ja edullisen raaka-aineen alueilla.

Uudet informaatioalustat tulevat muuttamaan perinteistä paperin käyttöä ja pakottavat metsäteollisuuden etsimään uusia tuotteita, käyttökohteita tuotteilleen sekä palvelukonsepteja. Uusia kokonaistehokkuutta lisääviä teknologioita ja uusia tapoja tuottaa vetovoimaisia painotuotteita kehitetään. Massa- ja paperiteollisuudessa ehkä suurimmat uudet

mahdollisuudet liiketoiminnan laajentamiseksi tulevat bioenergiasta ja biojalosteista. Biomassasta voidaan valmistaa ja saada energiaa eri muodoissaan (esim. liikennepolttoaineita), biomateriaaleja ja kemiantuotteita. Uusia mahdollisuuksia avaa myös tieto- ja viestintäteknologian yhdistäminen pakkaus- ja paperituotteisiin. Puutuoteteollisuudessa uusia tuoteinnovaatiomahdollisuuksia nähdään erilaisissa fysikaalisesti ja kemiallisesti modifioituissa tuotteissa, äly- ja funktionaalisissa tuotteissa, puu-puukomposiiteissa ja puun ja muiden materiaalien komposiiteissa sekä rakennepuutuotteissa (Hetemäki et al. 2006).

Tilanne aiheuttaa muutospaineita Suomen metsäteollisuudelle. Sen on pystyttävä parantamaan kannattavuuttaan. Erikoisesti energian käyttöä pyritään vähentämään ja bioenergian tarjoamia mahdollisuuksia hyödyntämään. Biomassan energiankäyttöä lisättäessä tulee huolehtia puun riittävydestä jalostukseen. Riittävä sähköntarjonta turvaa edullisemmän sähkön, muussa tapauksessa nousevat markkinahinnat rasittavat eritoten metsäteollisuuden kustannusrakennetta. Tuotantovolyyymi onkin siirtymässä kilpailukykyisimpiin ja uusimpiin tehtaisiin. Metsäklusterin vision 2030 mukaan puolet tulevaisuuden arvosta tulee tuotteista, joita ei vielä tänään valmisteta, samalla kun tuotteiden ja palvelujen arvo kaksinkertaistuisi. Kotimaisen puun käyttö olisi neljänneksen nykyistä suurempi (Metsäteollisuus ry 2007; Metsäklusteri 2006).

Poimintoja Metsäklusterin tutkimuksen painopisteiden tavoitteista:

- Kehittää uusia älykkäitä puu- ja kuitutuotteita pakkaamiseen, rakentamiseen ja viestintään
- Laajentaa puusta, sen osista ja siitä erotetuista yhdisteistä valmistettujen tuotteiden käyttöä
- Kehittää puun uusia käyttökohteita
- Erottaa puusta materiaaleja, kemikaaleja ja energiatuotteita
- Kehittää toimiva biojalostamoteknologia, luoda jatkojalostukselle uusia polkuja ja arvoketjuja
- Varmistaa metsien kestävä ja kannattava käyttö, ohjata ominaisuuksiltaan erilaisen puun käyttöä eri käyttökohteisiin
- Kehittää radikaalisti uudenlaisia energiatehokkaita ja resursseja säästäviä tuotantoteknologioita
- Parantaa Metsäklusterin arvoketjujen tehokkuutta, joustavuutta ja kestävä kehityksen mukaisuutta
- Kehittää painetun viestinnän ja pakkaamisen arvoketjuun uusia houkuttelevia, asiakkaitten tarpeisiin sovitettuja, kustannustehokkaita ja ympäristöystävällisiä tuotteita, teknologioita ja palvelukonsepteja

- Kehittää puu parhaaksi vaihtoehdoksi rakentamisessa ja sisustamisessa
- Kehittää tulevaisuuden asiakasratkaisuja uusille tuotealueille, kuten kemian tuotteisiin ja energiatuotteisiin.

Voidaankin sanoa, että metsäteollisuus Suomessa elää murroskautta, ja tulevaisuuden ennustaminen on erityisen vaikeaa, koska sekä tuotantovolyymit että tuotantorakenne voivat muuttua huomattavasti tarkastelujakson aikana. Puunkäyttö nykyisiin tuotteisiin tulee todennäköisesti vähenemään tulevaisuudessa. Hetemäki (2008) ennustaa, että 10–15 % vuoden 2006 tuotantokapasiteetista tulee poistumaan lähivuosina siitä huolimatta, että esim. pakkaustuotteilla on kasvunäkymiäkin. Edelleen kasvavat kehittyvät markkinat eivät auta suoraan Suomen omaa tuotantoa. Tuotteet tulevat kehittymään ja muuttumaan, uutta energiaa säästävää teknologiaa tullaan ottamaan käyttöön ennen vuotta 2050, mahdollisesti perustuen teknologioihin, joista ei vielä ole edes tietoa. Näiden syiden takia metsäteollisuuden tulevaisuuden energiankulutuksen ennustamisen on haastavaa, ja vanhat tulevaisuuden lineaariset skenaariot tuskin enää pätevät.

Kaikista epävarmuuksista huolimatta kansantalouden kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että Suomen strateginen resurssi, neitseellisen kuidun varannot, tullaan jatkossakin tavalla tai toisella hyödyntämään täysimääräisesti, kestävästi ja tehokkaasti teollisessa tuotannossa, edelleen jalostusarvoa lisäten.

4.3.1 Metsäteollisuuden energiankulutus

Teollisuuden päätoimialoista metsäteollisuus on energian kulutuksen kannalta Suomessa edelleen merkittävin sektori. Massa- ja paperiteollisuuden (poislukien mekaaninen metsäteollisuus) sähkön kulutus on noin 26 TWh, lämmön kulutus 156 PJ ja lisäksi polttoaineita on käytetty 272 PJ. Nämä muodostavat kaikkiaan noin 35 % Suomen primäärienergian kokonaiskulutuksesta (VTT 2007). Ennen työsulkuvuotta 2005 sähkön kulutus oli koko metsäteollisuudessa 27,5 TWh. Tuoreimpien tietojen mukaan vuonna 2006 metsäteollisuuden sähkön kulutus olisi ollut 28,1 TWh, kasvu noin 2 % vuodesta 2004 (Tilastokeskus 2007).

EK ja Energiateollisuus ry (2007) ennustavat metsäteollisuuden sähkön kulutuksen nousevan 35,7 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä suotuisan talouden kehityksen ja vakaan kasvun vallitessa. Skenaariossa on lisäksi oletettu, että Suomen metsäklusterin tutkimusstrategiassa asetettu tavoite tuotteiden ja palveluiden arvon kaksinkertaistamisesta vuoteen 2030 mennessä toteutuisi ja että perusparannus- ja uusinvestointien yhteydessä tuotantokapasiteetti edelleen kasvaisi. Samoin oletetaan, että yhä parempia paperilaatuja valmistettaisiin, mikä vaatisi lisää sähköenergiaa.

Ainakin hetkellisesti suunta on toinen. Vuoden 2008 alussa lakkautettavan Stora Enson Summan tehtaan myötä sähkön kulutus Suomessa laskee 1 000 GWh, ja Kemijärven sellutehtaan sulkemisesta aiheutuu edelleen noin 140 GWh:n säästöt (Lundén 2008). Yhdessä nämä sulkemiset edustavat 4,4 %:n laskua massa- ja paperiteollisuuden sähköenergiankulutukseen. Ne perustuvat yllä annettuun arvoon ja edustavat koko Suomen sähkön kulutuksesta (90 TWh) 1,3 prosenttia. Tämän lisäksi alasajoja on pantu toteen vuonna 2006 UPM-Kymmeneen toimesta Voikkaalla ja Kuusankoskella, ja näiden alasajojen vaikutukset näkyvät vasta vuoden 2007 energiatilastoissa, joita ei vielä ole ollut saatavilla tätä kirjoitettaessa. Paineita uusille kapasiteetin alasajoille on olemassa, ja Hetemäen (2008) arviot 10–15 %:n alasajoista lähivuosina 2006 tasoon verrattuna voivat olla mahdollisia.

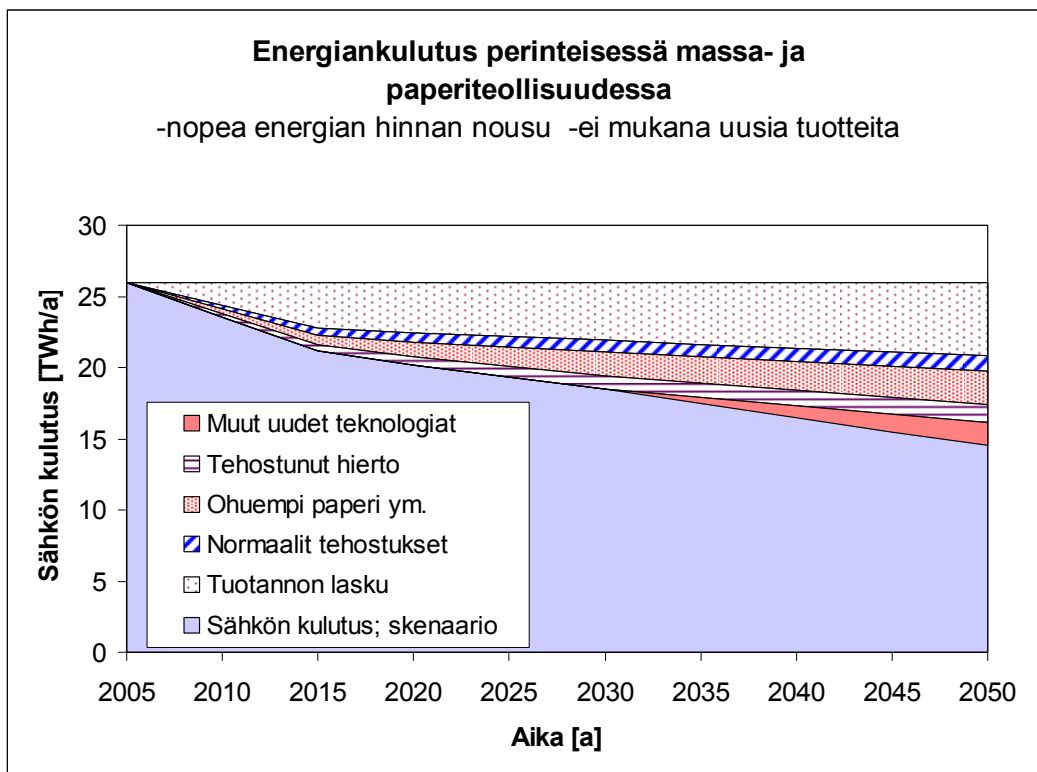
Mekaanisen metsäteollisuuden sähköenergiankulutus on Suomessa vain noin 6–7 % metsäteollisuuden sähkön kokonaiskulutuksesta. Esimerkiksi rakentamiseen suunnattujen tuotteiden valmistus kuluttaa tyypillisesti huomattavasti vähemmän energiaa kuin muiden rakennusmateriaalien valmistus. Mm. betonin valmistus vaatii kaksinkertaisen määrän energiaa verrattuna sahatavaran energiankulutukseen (< 500 kWh/m³). Mahdollinen puuvarannon hyödyntämisen uudelleen suuntaus kuitumassojen valmistuksesta esimerkiksi mekaaniseen metsäteollisuuteen pienentäisi oleellisesti metsäteollisuuden kokonaisenergiankulutusta. Energiankulutus on kuitenkin edelleen vain yksi muuttuva kustannuskomponentti teollisuuden hakiessa mahdollisimman tuottavaa muotoa hyödyntää Suomen metsävarantoa. Mekaanista metsäteollisuutta ei käsitellä tässä katsauksessa tarkemmin sektorin pienuuden vuoksi.

Metsäteollisuuden energian tarve voidaan laskea tuotantoprosessikohtaisten ominaiskulutusarvioiden avulla. Ominaiskulutukset ovat muuttuneet prosessiteollisuudessa varsin hitaasti. Tämä johtuu olemassa olevien prosessitekniikoiden edelleen kehittämisestä ja uusien merkittävien prosessitekniikan läpimurtojen vielä antaessa odottaa kaupallisia sovelluksia.

Koska metsäteollisuus on Suomessa suurin yksittäinen sähkön kulutussektori, sähkön käytön tehostamisella voidaan merkittävästi vaikuttaa sähköntuotannon hiilidioksidipäästöihin. Suomen massa- ja paperiteollisuuden energian kokonaiskäytön tehokkuuden voidaan olettaa olevan kansainvälisessä vertailussa hyvä, mikä vähentää tehostusmahdollisuuksia, ennen kuin kokonaan uusia tuotteita aletaan valmistaa ja uusia valmistusprosesseja otetaan käyttöön.

Kuvassa 4.1 esitetään eräs mahdollinen polku massa- ja paperiteollisuuden perinteisen tuotannon sähkön käytölle. Oletetaan, että sähkön hinta kallistuu nopeasti ja perinteisten tuotteiden kulutus kääntyy laskuun. Uudet tuotteet, joiden tuotannon sähkönkulutus ei ole esitetyssä skenaariossa mukana, tulevat myös tarvitsemaan energiaa ja tuottamaan lisäarvoa suomen metsävarannon tuottamalle puulle. Kuvaajassa alimpana oleva pinta-

ala kuvaa skenaarion mukaista sähkön kulutusta. Tämän päivän kulutuksesta vähennetään ensimmäisenä perinteisen tuotannon supistuminen Suomessa 12,5 % vuoteen 2015 mennessä (Metlan arvio supistumiseksi lähivuosina 10–15 %), ja tuotannon oletetaan tästä edelleen supistuvan lähtötasostaan 20 % vuoteen 2050 mennessä. Sähkön kulutuksen oletetaan pienentyvän vastaavasti. Seuraavaksi vähennetään kumulatiivisesti normaalit tehostustoimet; yleistä prosessin optimointia ja tehostuneita moottoreita, pumppuja, puhaltimia yms. Siinä oletetaan 3 %:n tehostuminen vuoteen 2020 mennessä ja edelleen 5 %:n tehostuminen vuoteen 2050 mennessä. Seuraava vähennys kuvaa uusien ohuempilaatuisten paperien valmistuksen ja siihen läheisesti liittyvien muiden teknologioiden käyttöönottoa. Oletuksena on 10 %:n sähkönsäästö vuoteen 2030 mennessä ja edelleen 15 %:n säästö vuoteen 2050 mennessä. Säästö on laskettu kuvaan pois lukien kemiallisen massan valmistus (21 % sähkön kulutuksesta massa- ja paperiteollisuudessa), joka on luokkaa 12 % vuonna 2050. Hierteen valmistuksen tulevaisuuden teknologiat mahdollistavat sähkön kulutuksen 20 % laskun vuoteen 2020 ja 30 % laskun vuoteen 2050 mennessä hierteen valmistuksessa. Vuonna 2050 säästövaikutuksen arvioidaan olevan koko massa- ja paperiteollisuuden perinteisen tuotannon energiankulutuksessa luokkaa 7 % (mekaaninen massa edustaa noin 40 %:n osuutta massa- ja paperiteollisuuden sähkönkulutuksesta; mekaaninen massa jakautuu edelleen hiokkeeseen ja hierteeseen). Aikajänteen pituuden takia lisäksi oletetaan, että lisätehostuksia, joista ei vielä tiedetä, voitaisiin löytää 10 % ajalla 2030–2050. Näillä oletuksilla perinteisen metsäteollisuuden energiankulutus olisi laskenut tasolle 14,6 TWh, pois lukien uudet tuotteet.



Kuva 4.1. Eräs energian kulutusennuste eräille mahdollisille kehityskäytännöille. Kehityskäytännöt on vähennetty aina edellisestä tasosta kumulatiivisesti ylhäältä alas luettaessa. Tuotannon määrän ennustaminen pitkällä aikavälillä sisältää suuren epävarmuuden.

4.3.2 Kemiallisen massan valmistus

Kemiallisen massan valmistus käsittää Suomessa nykyisin käytännössä ainoastaan sulfaattisellun valmistuksen. Sulfiittisellun valmistus loppui tilastojen mukaan kokonaan vuonna 1991.

Kemiallisen massan valmistus kuluttaa Suomessa 5,4 TWh sähköä ja 90 PJ lämpöä, ja osuudet ovat Suomen massa- ja paperiteollisuuden sähkön kokonaiskulutuksesta 21 % ja prosessilämmön kokonaiskulutuksesta 58 % (VTT 2007).

Suurin osa käytetystä sähköstä kuluu massan pumppauksessa, sekoittamisessa, puhaltimilla ja kompressoreilla, ja vain noin neljännes kuluu varsinaiseen prosessointiin. Sähköenergian käyttöä pystytään tulevaisuudessa tehostamaan edelleen taajuusmuuttajien, korkean hyötysuhteen moottorien, oikean pumppujen ja puhaltimien mitoituksen ja prosessin entistä parempien säätöjen avulla.

Suorapolttoaineita on edelleen käytössä massan valmistuksessa, lähinnä meesauuneilla. Meesauunien osalta on olemassa potentiaalia vähentää kasvihuonekaasuja vaihtamalla vielä öljykäyttöiset uunit hyödyntämään puun kaasutustekniikkaa.

Wising (2003) on laskenut prosessi-integraation keinoin mahdollisuuksia tehostaa energiankäyttöä kemiallisen massan valmistuksessa. Tutkimusten ja laskelmien mukaan modernista sellutehtaasta on kohtuullisin kustannuksin edelleen löydettävissä 1–2,2 GJ:n säästöt lämpöenergiassa ilmakehää sellutonta kohden, mikä vähentää vastaavasti tuorehöyryn tarvetta. Tämä vastaa noin 10–20 %:n säästöjä kemiallisen massan kokonaislämmöntarpeessa, ja perustuu lämmönkulutuksen arvoon 10,5–12 GJ/t. Säästö syntyy lähinnä vesien lisääntyneen kierrättämisen kautta, mikä vähentää näin veden tarvetta, jolloin oikean mitoituksen kautta vapautuu lämmönlähteitä lämpimän ja kuuman veden tuottamisesta muualla käytettäväksi. Suurempaan prosessiveden tuotantomäärään mitoitettu laitos voi joutua vedenoton vähentyessä ohjaamaan lämmin- ja kuumavesitankeistaan ylivuodon suoraan esim. jäähdytystornille. Vähävetisyyden myötä prosessista pitää poistaa NPE- (non-process elements) aineita erilaisten munuaistekniikoiden ja suodatus-ten kautta. Vapautuneita lämmönlähteitä voidaan hyödyntää esimerkiksi haihduttamalla (vaatii haihduttamon uudelleen mitoituksen), pumppaamalla lämpöpumpulla korkeammalle lämpötilatasolle, tai esimerkiksi kaukolämpöverkossa. Säästynyt tuorehöyry on mahdollista hyödyntää lauhdevoiman tuottamisessa, jos tehdas/voimalaitos ei enää käytä fossiilisia polttoaineita kuten on tilanne uusinvestointi- ja moderneissa laitoksissa. Vaihtoehtoisesti tuorehöyryn tarpeen vähentymisen myötä on mahdollista vähentää suoraan fossiilisten polttoaineiden käyttöä, tai edelleen tuottaa biopolttoainetta muualla käytettäväksi perustuen mustalipeän delignifointiin ennen jäljelle jääneen mustalipeän polttoa soodakattilassa. Oivaltava laitesuunnittelu yhdessä prosessi-integraation kanssa voi myös avata uusia mahdollisuuksia säästää energiaa. Toisaalta energiatehokkaampien prosessilaitteiden kehitys saattaa myöhemmin vähentää hyödynnettävissä olevaa lämmön määrää ja näin vähentää toteennäytettyä potentiaalia, tosin samaan aikaan vähentää sähkön ja/tai lämmön käyttöä suoraan.

Uusia yhdistettyihin kaasutus- ja kombivoimalaitosprosesseihin perustuvia sähköntuotantoprosesseja, joilla on korkea sähköntuotannon hyötysuhde, on kehitteillä. Mustalipeän kaasutukseen on kehitteillä Chemrec- ja MTCI-prosessit. Näiden tekniikoiden oletetaan olevan kaupallisesti saatavilla aikaisintaan viiden vuoden kuluttua. Kaasutustekniikat vaativat lisäksi huomattavasti kiinteää biomassaa lisäpolttoaineena tuottaakseen edelleen tarvittavan lämmön integraattiin sähköntuotannon hyötysuhteen ollessa kuitenkin korkea, n. 55 %. On laskettu, että vastapainebiosähkön hinta Suomessa on noin 30 €/MWh, kun taas kiinteästä biomassasta kaasutuksen kautta tuotettu sähkö maksaisi noin 40 €/MWh. Edelleen, mustalipeän kaasutuksella kannattavasti tuotettu sähkö maksaisi noin 60 €/MWh. Mustalipeän kaasutustekniikat kombivoiman tuotantoon eivät näin ollen ole ainakaan toistaiseksi taloudellisesti perusteltuja (VTT 2007).

Tällä hetkellä Suomessa panostetaan useammassa teollisuuskonsortiossa biomassan kaasutukseen perustuvan biopolttoaineiden tuotantoteknologian kaupallistamiseen. Prosessissa valmistettaisiin ensin biomassan kaasutuksella ja kaasun puhdistuksella ja käsittelyllä synteesikaasua, josta valmistettaisiin tunnetuilla synteesiprosesseilla biopolttoaineita. Tällainen biopolttoaineiden tuotantolaitos tuottaa sivutuotteena huomattavasti energiaa höyryn tai polttoainekaasun muodossa, ja tällaisen tuotantolaitoksen integrointi sellutehdasintegraatin kanssa on tehokas vaihtoehto. Integraatissa ovat lämmöntarve ja puun ja muun biopolttoaineen kuljetuslogistiikat jo olemassa. Onkin laskettu, että sellutehdasintegraatin yhteyteen toteutettu biopolttoaineiden tuotantolaitos, joka perustuu VTT:n kehittämään kaasutusprosessiin, voisi tuottaa Fischer-Tropsch (FT)-polttonesteitä alle 14 €/GJ (= 50 snt/litra), kun laitoksen kapasiteetti on 200 MW (syöttö sisään). Öljypohjaiset polttonesteiden hinnat ovat luokkaa 11 €/GJ ennen veroja ja jakelua asemille (VTT 2007).

Tällaiset uudet sellu- ja paperitehtaaseen integroidut laitokset eivät sinällään vähennä itse kemiallisen massanvalmistuksen prosessin vaatimaa sähkön tai lämmön tarvetta. Oheistuotteena saatava energia, mahdolliset biopolttoaineet ja muut puuperäiset aineet muuttavat kyseisen integraatin kokonaisenergiatasetta. Tehtaalle tarvitaan entistä enemmän puuta mahdollisten lisä tuotteiden ja integraatin tarvitseman lämpöenergian tuottamiseksi. Uudet prosessivaiheet kuluttavat myös energiaa itsessään. Tällaista tehdasta ei ole enää mahdollista tarkastella per tuotettu tonni sellua siten, että lisäenergian tarve, saanto ja raaka-aineet kohdistettaisiin yksin sellulle. Uusien tuotteiden myötä syntyy tarve allokoida käytetyt hyödykkeet oikein lopputuotteille.

Niin kauan kuin metsäpolttoainetta on saatavilla riittävästi ja kemiallinen massanvalmistus ei käytä fossiilisia polttoaineita, lämpötalouden edelleen tehostaminen ei juurikaan vaikuta fossiilisperäisiin kasvihuonepäästöihin suoraan. Välilliset vaikutukset näkyvät mahdollisesti lisääntyneenä sähköntuotantona ja vähentävät marginaalisähkön tuoton tarvetta, ja vastaavasti vähentävät kasvihuonepäästöjä voimantuotannossa. Tai välilliset vaikutukset näkyvät esimerkiksi sivutuotteena jalostetun biopolttoaineen kautta, riippuen tämän tuotetun biopolttoaineen hyödyntämispolusta.

Taulukossa 4.1 on arvioitu teknologian vaikutuksia sähkön- ja lämmönsästöön kemiallisen massan valmistuksen yhteydessä. Lisäksi on arvioitu, milloin teknologia olisi kaupallisesti käytettävissä, sen investointikustannukset per tuotantokapasiteetti sekä energian säästöön kautta saavutettavat säästöt per tuotettu tonni.

Taulukko 4.1. Teknologioiden potentiaalit kemiallisen massan valmistuksessa.

Teknologia	Sähkön- säästö- potentiaali [%]	Lämmön- säästö- potentiaali [%]	Teknologia hyödynnet- tävissä	Lisä- investointi [€/ kapasiteetti- tonni]	Käyttö- kustannus- säästö [€/tuotettu tonni]
Tehokkaampi lämpöintegraatio	-	10–20 %	2008	0–25	10–25

Lisäksi voidaan olettaa, että seuraavia yleisiä tehostamistoimenpiteitä tapahtuu:

- Yleinen prosessin optimointi
- Kehittyneemmät prosessinohjausmenetelmät ja säädöt
- Tehokkaammat moottorit, pumput ja vaihteet, taajuusmuuttajat, lämmönsiirtimet
- Oikea mitoitus.

4.3.3 Mekaanisen massan valmistus

Mekaanisten massojen tuotanto on hyvin sähköintensiivistä, joten tuotannon välilliset vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin ovat suuret. Mekaanisen massan tuotannon sähkönkulutus on noin 10 900 GWh, ja se on luokkaa 41 % metsäteollisuuden sähkön kokonaiskulutuksesta (VTT 2007).

Mekaanista massaa käytetään lähinnä tuomaan lujuus- ja optisia ominaisuuksia papereihin. Massan valmistukseen käytetty puu pystytään hyödyntämään lähes kokonaan tuotetussa massassa. Massaa voidaan valmistaa hiomalla ja hiertämällä. Hiokkeen sähköenergian kulutus on pienempi kuin hierretyn massan, mutta toisaalta hierrätyksessä käytetystä sähköenergiasta pystytään hyödyntämään jopa 65 % matalapainehöyrynä mm. paperin kuivatuksessa, mikä vähentää vastaavasti polttoaineen käyttöä höyryn tuottamiseksi. Mekaanisen massan sähköintensiivisyys aiheuttaa haasteita tulevaisuuteen. On arvioitu, että jopa 50 %:n säästöt hiertämisessä olisivat saavutettavissa, ja teoreettinen säästöpotentiaali olisi vieläkin suurempi. Jos sähkön hinta jatkaa nousuaan, se aiheuttaa haasteita mekaaniseen massaan perustuvien paperilaatujen valmistukseen, varsinkin, kun näiden tuotteiden hintakehitys on ollut laskeva.

Hierteen valmistuksessa kehitetään uusia teknologioita, joissa on mahdollista saavuttaa huomattavaa energiansäästöä:

- Jauhinkonstruktion kehitystyö

- Jauhetun massan lajittelu ja rejektin käyttö esim. kerrosrainauksista hyväksi käyttäen suoraan ilman rejektivaiheen jauhatusta
- Puuraaka-aineen lajittelu ennen jauhatusta
- Puulastujen ja rejektin entsyymi- ja/tai kemikaalikäsittelyt ennen jauhatuksia.

Taulukossa 4.2 on arvioitu uusien teknologioiden vaikutuksia sähkön- ja lämmönsäätöön mekaanisen massan valmistuksen yhteydessä. Lisäksi on arvioitu, milloin teknologia olisi kaupallisesti käytettävissä, sen investointikustannukset per tuotantokapasiteetti sekä energiansäästön kautta saavutettavat säästöt per tuotettu tonni. Mekaanisen massan valmistuksen yhteydessä tuotetaan matalapainehöyryä, ja negatiivinen lämmönsäästöpotentiaali kuvaa prosessihöyryn vähentynyttä tuotantoa. Entsyymikäsittelyjen yhteydessä on säästöpotentiaalissa huomioitu entsyymien hinta.

Taulukko 4.2. Teknologioiden potentiaalit mekaanisen massan valmistuksessa.

Teknologia	Sähkön-säästö-potentiaali [%]	Lämmön-säästö-potentiaali [%]	Teknologia hyödynnettävissä	Lisä-investointi [€/ kapasiteettitonni]	Käyttö-kustannus-säästö [€/tuotettu tonni]
Uudet jauhin-konstruktiot	50 %	-75 %	2020	20–40	25–35
Massan lajittelu ja rejektin käyttö esim. kerrosrainauksessa	20 %	-30 %	2015	10–20	7–17
Puuraaka-aineen lajittelu	10 %	-15 %	2015	10–20	5–10
Hakkeen /massan entsyymi-/kemikaalikäsittelyt	15 %	-23 %	2010	2–6	3–6

Lisäksi voidaan olettaa, että seuraavia yleisiä tehostamistoimenpiteitä tapahtuu:

- Yleinen prosessin optimointi
- Kehittyneemmät prosessinohjausmenetelmät ja säädöt
- Tehokkaammat moottorit, pumput ja vaihteet, taajuusmuuttajat, lämmönsiirtimet
- Oikea mitoitus.

Huomioitavaa on, että säästettäessä sähköenergiaa jauhatuksessa saadaan vähemmän lämpöä matalapainehöyrynä paperikoneelle, ja tämä vähennys on kompensoitava vähentämällä höyryn käyttöä tai käyttämällä lisäpolttoainetta höyryn lisätarpeen tyydyttämiseksi.

4.3.4 Kiertokuitumassan valmistus

Keräyspaperi on merkittävä paperin ja kartongin valmistuksen raaka-aine. Suomessa merkittävyys on pienempi, sillä valtakunnallisesti paperia kulutetaan vähän (noin 1,1 miljoonaa tonnia) suhteessa tuotantoon.

EU-maissa (CEPI-maat) keräyspaperin kierrätysaste verrattuna paperin ja kartongin kokonaistuotantoon oli vuonna 2005 keskimäärin peräti 54,6 % ja käyttö suoraan paperin tai kartongin tuotantoon 47,6 %. Suomessa kierrätysaste oli lähes yhtä korkea (52,8 %), mutta johtuen suuresta lähinnä vientiin suunnatusta tuotannostaan (tuotanto yli 12 milj. t, viennin osuus n. 92 %), käyttö suoraan paperin ja kartongin tuotantoon Suomessa jää alhaiseksi (4,8 %). Keräyspaperin talteenottoaste on Suomessa 69,8 %, joka on CEPI-maiden keskiarvoa korkeampi. Suomesta saatavan keräyspaperin määrä paperin kokonaistuotantoon verrattuna jää väistämättä pieneksi. Suomi nettovei kierrätyspaperia 192 000 tonnia vuonna 2005; vienti kasvoi vuodesta 2004 kokonaista 243 % (CEPI 2006). Tämä on hieman yllättävää, sillä aiemmin on oletettu Suomesta muodostuvan nettotuoja. Kierrätyspaperin tuonti- tai vientimääriä onkin vaikea ennustaa. Mm. Kiinan markkinat ovat vaikuttaneet voimakkaasti keräyspaperin hintoihin Euroopassa.

Kiertokuitumassan valmistuksen ominaisenergiankulutus on puumassoihin verrattuna varsin pieni, mutta tästä huolimatta ei IPCC:n raportin mukaan ole kyetty luotettavasti arvioimaan globaalia kasvihuonekaasujen vähennyspotentiaalia, kun verrataan muihin mahdollisiin käytetyn paperin hyödyntämispolkuihin. Kiertokuidun hyödyntäminen on taloudellisinta suurimpien keräysvolyymien alueilla, joten sen käytön voimakas lisääntyminen Suomessa tuonin kautta ei vaikuta todennäköistä. On edullista pyrkiä edelleen tehostamaan kotimaisen keräyspaperin talteenottoa ja lajittelua sekä minimoimaan keräyspaperin hyödyntämisen häviöitä.

Kierrätyskuitumassaan liittyen on viime aikoina kehitetty seuraavia teknologioita:

- Sensorien kehitys parantamaan kierrätyspaperin lajittelua ja laadun hallintaa; näin tehostetaan koko ketjua ja vähennetään myös energian käyttöä
- Ekotehokkaat siistauslinjat; energiansäästö siistauslinjalla 20 %, integraattitasolla tarkasteltuna muutama prosentti
- LWC-paperi sataprosenttisesta DIP-massasta säästää välillisesti energiaa DIP-massan syrjäyttäessä mekaanista massaa.

Taulukossa 4.3 on arvioitu ekotehokkaan siistauslinjan vaikutuksia sähkön- ja lämmön-säästöön siistausmassan valmistuksen yhteydessä. Lisäksi on arvioitu, milloin teknologia olisi kaupallisesti käytettävissä, sen investointikustannukset per tuotantokapasiteetti sekä energiansäästön kautta saavutettavat säästöt per tuotettu tonni.

Taulukko 4.3. Teknologioiden potentiaalit kiertokuitumassan valmistuksessa ja mihin mennessä potentiaali on täysimääräisesti hyödynnettävissä.

Teknologia	Sähkön-säästö-potentiaali [%]	Lämmön-säästö-potentiaali [%]	Teknologia hyödynnettävissä	Lisä-investointi [€/ kapasiteettitonni]	Käyttö-kustannus-säästö [€/tuotettu tonni]
Ekotehokkaat siistauslinjat	20 %	-	2015	100–120	2–5

Lisäksi voidaan olettaa, että seuraavia yleisiä tehostamistoimenpiteitä tapahtuu:

- Yleinen prosessin optimointi
- Kehittyneemmät prosessinohjausmenetelmät ja säädöt
- Tehokkaammat moottorit, pumput ja vaihteet, taajuusmuuttajat, lämmönsiirtimet
- Oikea mitoitus.

Energiankäytön tehostamisen merkitys kiertokuitumassan valmistuksen aiheuttamiin kasvihuonekaasupäästöihin Suomessa on hyvin pieni.

4.3.5 Paperin ja kartongin valmistus

Paperin ja kartongin valmistuksen sähköenergian kulutus on noin 9,5 TWh ja prosessilämmön kulutus 73 PJ (VTT 2007).

Kun katsotaan sähkön- ja lämmönkulutuksia historiassa verrattuna nykypäivään, on paperin ja kartongin tuotannossa sähkön ominaiskulutus kuitenkin edelleen 85–97 % 1970-luvun tasosta. Nopeammat koneet ja paremmat laadut ovat vieneet osansa muuten tehostuneesta tuotannosta (kehittyneemmät menetelmät, koneet, tehostuneet moottorit, tehostunut ajankäyttö). Lämmön ominaiskulutus on 84–91 % 1970-luvun tasosta.

On arvioitu, että paperikoneiden nopeudet saattavat edelleen jonkin verran kasvaa, jotta saataisiin täysin hyödynnettyä investoinnit edelleen tehostuvan tuotannon kautta. Nopeuksien

nostaminen lisää sähköenergian kulutusta voimakkaasti paperikoneella. Häviöt paperikoneella kasvavat suhteessa nopeuden toiseen potenssiin, jolloin tietyn nopeuden ylittyessä kustannusrakenne muuttuu epäedulliseksi. Silti sähkön kustannus on edelleenkin vain yksi muuttuva kustannuskomponentti (esim. osuus alle 15 % kokonaiskustannuksista eräällä sanomalehtikoneella), ja vaikuttaa edelleen kustannustehokkaalta tehostaa tuotantoa nopeuksia kasvattamalla. Nopeuden nostamisen suhteen teknologiset rajoitukset alkavat lähestyä, sillä mm. vedenpoistosta viiralla, kuivatusvaiheessa ja puristuksessa samoista tehtävistä on selvittävä entistäkin nopeammin, ja tätä kautta koneiden investointikustannukset saattavat kasvaa, jolloin nopeuden noston kautta saatava lisätuotanto ei enää toisikaan haluttua lisätuottoa. Koneiden leveydet eivät ole enää viime vuosina kasvaneet. Sähkön kulutusta nostavat tulevaisuudessa edelleen mahdollisesti parantuvat laadut, jos sama kehityssuunta jatkuu kuten tähänkin saakka.

Kuivatuksessa puristuksen jälkeen edelleen poistettava vesi vaatii tietyn teoreettisen määrän energiaa, mikä asettaa samalla rajoitukset kehitykselle. Puristuksessa poistettavan veden määrää tehostamalla voidaan säästää kuivatusenergian tarpeessa, samoin edelleen tehostamalla lämmön talteenottoa ulospuhallusilmasta. Veden käytön pienentäminen vähentää samalla prosessilämmön tarvetta vesikiertoissa, jolloin joudutaan etsimään uusia kohteita, joissa voidaan hyödyntää talteensaataavaa lämpöä, esim. integroinnin tai lämpöpumppusovellusten kautta.

Tulevaisuudessa pyritään tuottamaan entistä kevyempää paperia, näin säästetään raaka-aineiden ja energian kulutuksessa. Kerrosrainaustekniikat ovat kehittyneet ja joissakin sovelluksissa jo käytössä. Entsyymikäsittelyillä voidaan vaikuttaa vedenpoisto- ja lujuusominaisuuksiin. Koneita pyritään yksinkertaistamaan ja nostamaan sakeuksia kierroissa, näin vähennetään pumppauksien tarvetta.

Teknologiaa kehitysmahdollisuuksia ovat:

- Kevyemmät laadut; esim. kerrosrainauksen avulla
- Entsyymikäsittely; parantunut vedenpoisto
- Kuivarainaus
- Korkeasakeusrainaus.

Taulukossa 4.4 on arvioitu muutaman teknologian vaikutuksia sähkön- ja lämmönsäätöön paperinvalmistuksen yhteydessä. Kuivarainaus on jätetty pois, sillä teknologian energiavaikutuksista ja hinnoista ei ollut tietoa saatavilla. Lisäksi on arvioitu, milloin teknologia olisi kaupallisesti käytettävissä, sen investointikustannukset per tuotantokapasiteetti sekä energiansäästön kautta saavutettavat säästöt per tuotettu tonni. Entsyymikäsittelyn ja kuidun korvaamisen yhteydessä säästöissä on otettu huomioon entsyymien hinta sekä kuidun ja täyteaineen hintaero.

Taulukko 4.4. Teknologioiden potentiaalit paperin ja kartongin valmistuksessa ja mihin mennessä potentiaali on täysimääräisesti hyödynnettävissä. Nykytonnilla saadaan tulevaisuudessa enemmän paperia pinta-alana mitattuna. Tonniekvivalentilla tarkoitetaan uuden tuotetun vastaavan pinta-alan painoa. Tonniekvivalentti on siis todellisessa painossa mitattuna tulevaisuudessa kevyempi.

Teknologia	Sähkön-säästö-potentiaali [%]	Lämmön-säästö-potentiaali [%]	Teknologia hyödynnettävissä	Lisä-investointi [€/tonniekvivalentti]	Käyttökustannus-säästö [€/tonniekvivalentti]
Mekaanisen vedenpoiston parantaminen	-	5 %	2010	-	1
Tuotteiden ohentaminen	10 %	8 %	2015	0–100	30–40
Korkeasakeus-rainaus	5 %	-	2020	30	1–3
Kuidun korvaaminen täyteaineella	-	0,5 % per 1 % -yksikkö korvattua kuitua	2008	-	4 € per 1 % -yksikkö korvattua kuitua

Lisäksi voidaan olettaa, että seuraavia yleisiä tehostamistoimenpiteitä tapahtuu:

- Yleinen prosessin optimointi
- Kehittyneemmät prosessinohjausmenetelmät ja säädöt
- Tehokkaammat moottorit, pumput ja vaihteet, taajuusmuuttajat, lämmönsiirtimet
- Oikea mitoitus
- Tyhjäjärjestelmien säädöt ja mitoitus
- Puristinosalla pitkänipit telanippien sijaan
- Materiaalikehitys (kitkan pienentäminen).

4.4 Terästeollisuus (metalliteollisuus)

Metalliteollisuuden (ml. koneiden ja laitteiden valmistus) polttoainekäytöstä Suomessa noin 90 % eli noin 65 PJ menee raudan ja teräksen jalostukseen (Tilastokeskus 2003). Myös valtaosa metalliteollisuuden sähkönkulutuksesta menee raudan ja teräksen valmistukseen (StatFin 2004), joten tässä keskitytään tähän teollisuuden alaan. Myös muiden metallisektorin toimialojen energiankulutus on kuitenkin Suomessa merkittävää (yh-

teensä noin 7 PJ) energiantensiivisen alan takia (Tilastokeskus 2003). Näilläkin aloilla pätevät yleisesti tunnetut teollisuuden energian kulutuksen vähentämisperiaatteet eli kierrätyksen lisääminen sekä eristysten, säätöjen, paineilmajärjestelmien ja lämmön talteenoton ja hyötykäytön kehittäminen. Myös taajuusmuuntajilla ja korkean hyötysuhteen moottoreilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä.

Teräksen valmistus voidaan jakaa karkeasti kahteen reittiin. Nämä ovat pääasiassa malmia raaka-aineenaan käyttävä masuuni + konvertteriprosessi (myöh. BF + BOF) ja yleensä enimmäkseen romurautaa käyttävä valokaariprosessi (EAF). Näistä EAF kuluttaa selvästi vähemmän energiaa, mutta sen käyttöä rajoittaa romuraudan saatavuus sekä prosessin suuri sähkönkulutus. Suuren sähkönkulutuksen takia EAF-prosessille on erityisen olennaista huomioida myös sähköntuotannon hyötysuhde ja päästöt. Romurautaa ennustetaan olevan tulevaisuudessa saatavilla kasvavia määriä kuluneiden vuosikymmenien aikana moninkertaistuneen globaalin terästuotannon (IISI 2005) ja teräksen pitkän käyttöiän takia. Koska kulutus on edelleen kasvussa, myös uutta, malmipohjaista terästä kuitenkin tarvitaan. Myös malmista rikastettua raaka-ainetta voidaan käyttää sähköuuneissa, kuten Tornion tehtaiden prosessissa. Tällöin rauta täytyy kuitenkin pelkistää esimerkiksi kaksin avulla, mikä lisää CO₂-päästöjä huomattavasti verrattuna romuraudan käyttöön. Suomessa käytössä olevia teräksen valmistusprosesseja on kuvattu tarkemmin mm. lähteessä (KTM 2005).

Suomessa merkittävimpien terästeollisuuden tehtaiden päästömäärät ja muutos aiemmasta julkaisusta (KTM 2005) on esitetty taulukossa 4.5. Muutoksesta voi päätellä myös muutosta lähteessä KTM (2005) esitettyihin päästövähennyspotentiaaleihin, joskin mm. päästökauppa on jo kannustanut toteuttamaan tehostamistoimia, ja myös teollisuudessa energiatehokkuuden kannalta olennainen kapasiteetin käyttöaste on voinut parantua. Jotkin tehdyistä laajennuksista lienevät myös energiatehokkaampia kuin vanhat. Lähteessä KTM (2005) esitettiin Raahan tehtaille vuoden 2002 ominaispäästöksi 1,691 t CO₂/t terästä (sisältäen valssaamon, mutta ei kalkinpolttamoa). Vuoden 2006 Raahan tehtaiden ympäristöraportissa ominaispäästö oli 1,686 t CO₂/t terästä ilman kalkinpolttamoa ja happitehdasta (Rautaruukki 2006). On syytä korostaa, että päästökaupan myötä päästöjen seuranta- ja raportointivelvoitteet ovat tarkentuneet, joten esitetyt luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia. Ominaispäästöjen voidaan kuitenkin todeta pysyneen likimain samoina ja siten taulukon 4.5 perusteella todeta CO₂-päästöjen kasvaneen lisääntyneen tuotannon takia huomattavasti.

Taulukko 4.5. Suomen terästehtaiden CO₂-päästöjä ja EAF-prosessien sähkönkulutuksia vuosilta 2002 (KTM 2005), 2005 ja 2006 (Päästöoikeustase 2006).

	Prosessi	CO ₂ [kt]	Sähkönkulutus [TWh]	CO ₂ [kt]	CO ₂ [kt]
		2002	2002	2005	2006
Koverharin terästehdas	BF + BOF	800		826	896
Raahan terästehdas	BF + BOF	4 300		4 747	4 811
Tornion tehtaot	EAF	577	1,5	682	734
Imatran terästehdas	EAF	56	0,3	56	56

Malmipohjaisen teräksen valmistukseen on jo melko pitkään kehitetty uusia prosesseja sekä useita kehityksiä perinteisiin menetelmiin. Uusille prosesseille on tyypillistä energiaa kuluttavien sintraamon ja koksaaon välttäminen erilaisilla, niin sanotuilla suora-pelkistysteknologioilla (BREF 2001a). Samalla myös monien päästöjen, kuten hengitetävien hiukkasten, on mitattu vähenevän. Taulukossa 4.6 on esitetty vaihtoehtoisia prosesseja teräksentuotantoon sekä muutamia mahdollisia kehityksiä perinteiseen BF+BOF-prosessiin. Kaikkien teknologioiden täsmällisestä soveltuvuudesta ja rajoituksista suomalaisissa terästehtaissa ei ole tarkkaa tietoa. Muutenkin tehtaiden ominaispäästöt ja -kulutukset ovat hyvin riippuvaisia mm. lopputuotteilta halutuista ominaisuuksista

Taulukko 4.6. Vaihtoehtoisia prosesseja teräksentuotantoon ja vaihtoehtoisia kehityksiä BF+BOF-prosessiin.

	Investointikustannus ¹⁾ [€/kapasiteettitonni]		Sähkönkulutus [MJ/t terästä]		Muu energiankulutus ²⁾ [MJ/t terästä]		Kapasiteetin käyttökerroin [0..1]			Arvio energian-säästöpotentiaalista ³⁾ [GWh/a]		Maksimipotentiaali kokonaismarkkinoista [%]		
	2007	2020	2050	2007	2020	2050	2007	2020	2050	2020	2050	2020	2050	
<i>Masuumi+BOF</i>	525	-5 %	-10 %	-185	-5 %	-10 %	17150	0,90	0,95	0,97	-	90	90	
<u>Uudet laitokset:</u>														
EAF	355	-5 %	-10 %	1525	-5 %	-10 %	975	0,95	0,97	0,97	11208	10951	50	70
Direct Reduction (e.g. Midrex) + EAF	510	-10 %	-15 %	1525	-5 %	-10 %	13475	0,90	0,95	0,97	-503	-448	15	70
Smelting Reduction (e.g. Finex) + BOF	446	-10 %	-15 %	-157	-5 %	-10 %	14578	0,90	0,95	0,97	3270	3204	10	70
<u>Tehostusinvestoinnit (vaikutus baseline-prosessin arvoihin)</u>														
Konverterrikaasujen talteenotto	?						-700				739	754	100	100
Voimalaitoksen modernisointi	42			-657	-657	-657					1981	2023	100	100
Top Gas Turbine	?			-300	-300	-300					905	924	100	100

¹⁾ Baseline laitoksen kapasiteetti noin 4 Mt/vuosi, pienemmille kustannus/tonni on suurempi. EAF on oletettavasti käyttökustannuksiltaan baseline-prosessia halvempi ja DRI-prosessi baselinea kalliimpi jos raaka-aineena on pelletti ja polttoaineena maakaasu.

²⁾ Kulutuksissa ei ole huomioitu esimerkiksi mahdollista pelletinvalmistuksen energiankulutusta (DRI-prosessi).

³⁾ Verrattuna baseline-laitokseen tai vaihtoehtoon, jossa rakennettaisiin uusi baseline-tyyppinen laitos. Riippuu monista oletuksista. Uusien laitosten kapasiteetiksi oletettu 4 Mt/vuosi, sähköenergian hyötysuhteeksi 35 % (keskiarvoinen marginaalisähkö nyt) ja tehostusinvestoinneissa kapasiteetiksi 4Mt (eli ei kapasiteetin kasvua tulevaisuudessa, joka lisäisi säästöpotentiaalia). Laitosten käyttökäytökä on hankala arvioida, mutta se on todennäköisesti hyvin pitkä (> 30 vuotta).

Baselinena taulukossa 4.6 on BF+BOF-prosessi. Energian ominaiskulutuksena on käytetty Rautaruukin ympäristöraportissa esitettyjä lukuja ja Rautaruukin tarkempia tilastoja (Rautaruukki 2006; Lerssi 2008). Tehdasintegraatti näyttää taulukon perusteella tuottavan sähköä, koska valssaamoa ei ole sisällytetty taseeseen. Vertailun vuoksi todettakoon, että keskimääräinen energiankulutus maailman terästuotannossa vuosina 2004–2005 oli 19,0 GJ/tonni ilman loppukäsittelyä ja 19,1 GJ/tonni, kun loppukäsittelyt, eli esimerkiksi valssaus, huomioidaan (IISI 2005). Raahen tehtaalle vastaavat luvut ovat noin 16,5 ja 18,5. Happitehtaiden ja kalkkitehtaiden kulutuksia ei ole näissä luvuissa huomioitu (IISI 2005; Rautaruukki 2006). Raportissa KTM (2005) arvioitiin Raahen tehtailla konverterrikaasun hyötykäytöllä, voimalaitoksen modernisoimisella ja pienemmillä toimilla saavutettavaksi yhteensä 100–200 kt:n vuosittainen päästövähennys. Konverterrikaasujen talteenottoa on Raahen tehtailla suunniteltu jo useita vuosia sitten, mutta sitä ei ole vielä toistaiseksi toteutettu.

Raahen tehdas on siis keskimääräistä energiatehokkaampi. Varsinkin BF+BOF-prosessiksi tehdas on muihin verrattuna erittäin tehokas, sillä esitetyssä maailman keskiarvossa on mukana myös valokaariuunien tuotanto (24 % otannassa mukana olevasta tuotannosta). Globaalin kasvihuoneilmiön hillitsemisessä tulisikin erityisesti varoa tuotannon siirtymistä päästökaupan ulkopuolelle energiatehokkuudeltaan huonompiin tehtaisiin. Taulukossa 4.6 esitetyille prosesseille loppukäsittelyn energiankulutuksen suuruusluokkaa voi arvioida Raahen tehtaan loppukäsittelyn (valssaamon) kulutuksen perusteella. Loppukäsittelyn energiantarve riippuu kuitenkin huomattavasti lopputuotteesta, loppukäsittelyprosessista ja sen integroinnista muuhun prosessiin. Tyypillinen esimerkki integroinnista on koksamo-, masuuni- ja konverterrikaasujen hyötykäyttö tehtaan prosesseissa. Myös teräsaihioiden varastointi ja jäähtyminen valun ja kuumavalssauksen välillä ja sitä seuraava uudelleen lämmitys kuluttaa energiaa, ja tätä voidaan välttää suunnittelussa ja käytännössä integroidulla prosessilla. Vastaavia eroja toimintatavoissa ei voida huomioida teknologiaperusteisissa tarkasteluissa. Lähteen VTT (2007) perusteella voidaan kuitenkin päätellä aihoiden jäähtymisestä aiheutuvan ylimääräisen energiankulutuksen olevan jopa 0,6 GJ/tonni terästä.

Loppukäsittelyn lisäksi tehtailla on myös muita hankalasti rajattavia kohteita, joiden sisältyminen esitettyihin tietoihin on joissain tapauksissa epävarmaa. Tällaisia ovat esimerkiksi mahdolliset happitehdas, kalkkitehdas ja voimalaitos, jotka saattavat sijaita samalla tehdasalueella terästehtaan kanssa ja lisäksi usein kuulua vielä eri yhtiöille. Sintraamot ja koksamot sisältyvät tässä esitettyihin lukuihin silloin kun niitä käytetään kyseisissä prosesseissa, mutta pelletointi tehdään yleensä kaivoksen yhteydessä ja siten se ei sisälly lukuihin. Tältä osin pellettiä käyttävät prosessit näyttävät taulukon perusteella hieman todellista tuotteen elinkaaren kulutusta paremmilta.

Suorapelkistettyä rautaa (DRI) voidaan myös lisätä BF+BOF-prosessiin kuten romuakin. Tällöin DRI:n käytöstä tuleva mahdollinen energiansäästö riippuu korvattavasta raaka-aineesta (romu tai raakarauta). Vaikka taulukon 4.6 perusteella teräksen tuotanto DRI+EAF-menetelmällä näyttäisi energiankulutuksen osalta olevan lähes samaa luokkaa kuin BF+BOF-teknologialla, ilmastomielessä DRI+EAF-reitti voi olla selvästi parempi. Jos DRI on valmistettu maakaasua käyttävällä prosessilla, sen CO₂-päästöt lienevät kivihiiltä käyttävää masuuniprosessia huomattavasti pienemmät. Lisäksi tarkasteltu baseline-tehdas on huomattavasti globaalia keskiarvoista BF+BOF-prosessia tehokkaampi.

Taulukossa esitettyjen keinojen lisäksi erikoisraskaan pohjaöljyn korvaaminen maakaasulla vähentäisi laitoksen CO₂-päästöjä, mutta maakaasua ei ainakaan toistaiseksi ole saatavilla Raahessa. Myös eräiden muiden polttoaineiden syöttö masuuniin ja polttoaineiden korvaaminen muissakin osaprosesseissa on ainakin teoriassa mahdollista. Kehittyneen kaasutusteknologian mahdollisuudet edellä mainituissa prosesseissa tulisi selvittää, sillä kaasun puhtausvaatimukset eivät oletettavasti ole niissä yhtä korkeat kuin esimerkiksi kaasuturbiineissa. Myös happirikkaamman polttoilman tai puhtaan hapen käyttö prosesseissa voisi vähentää energiankulutusta huomattavasti. Siirtyminen Raahan tehtaille pelletin käyttöön (kuten Koverharissa) vähentäisi tehtaan CO₂-päästöjä sintraamon sulkemisen myötä, mutta pellettien valmistus aiheuttaisi päästöjä jossain muualla, eikä kokonaisvaikutus ilmastonmuutoksen hillintään ole julkisesti saatavilla. Romun osuus raaka-aineesta vaikuttaa selvästi CO₂-päästöihin, joten sen osuus tulisi pyrkiä maksimoimaan ja varsinkin romuraudan päätymistä kierrätykseen edistää.

Tornion tehdasta on laajennettu voimakkaasti, ja sen takia myös absoluuttinen energiankulutus on huomattavasti kasvanut. Tehdas on maailman suurin ruostumattoman teräksen tuotantolaitos (KTM 2005). Prosessia on kuitenkin vuosien saatossa kehitetty BAT-tasoisilla ratkaisuilla, ja siten siellä ei ole kovinkaan paljoa tehostamisvaraa suhteessa laitoksen päästöihin (KTM 2005).

Lyhyesti kuvattuna Tornion prosessi perustuu sähköuneilla sulatettavaan ja koksini avulla pelkistettävään malmipohjaiseen raaka-aineeseen (kromiittirikaste) sekä romuun, josta osa sulaa sekoitettaessa sulaan ferrokromiin ja osa sulatetaan sähköuneissa seosaineiden ja pelkistävän koksini kanssa. Lopputuotteina tehdään eri seoksilla erilaisia ruostumattomia terästuotteita, joilla on erilaisia ominaisuuksia. Todellisuudessa prosessi on monimutkainen ja mm. hyvin integroitu, sillä eri vaiheiden hukkalämpöjä ja prosessikaasuja käytetään muissa vaiheissa. Myös kuonasta erotetaan käyttökelpoiset metallit ulkopuolisessa laitoksessa ja ne palautetaan takaisin prosessiin. Integraation hyötyjä on myös mm. ferrokromin siirtäminen ruostumattoman teräksen valmistukseen sulana. Myös aihoiden siirtäminen valssaukseen mahdollisimman kuumina voi vähentää merkittävästi kuumennukseen tarvittavaa polttoainemäärää.

Lähteen KTM (2005) mukaan Tornion tehtailla voitaisiin vähentää CO₂-päästöjä korvaamalla lämpökeskuksissa käytettävää raskasta polttoöljyä biomassalla. Vuonna 2002 POR:n käytöstä aiheutui noin 60 kt:n CO₂-päästöt. Nyt Tornioon on valmistumassa CHP-laitos, jossa poltettaneen merkittävästi biopolttoaineita, mutta myös mm. turvetta. Vaikutus kansallisiin päästöihin riippuu polttoaineseoksesta ja vaikutus terästehtaalle allokoitaviin päästöihin myös allokontiperiaatteista. Mikäli Tornioon olisi saatavilla maakaasua, voisi sillä korvata mm. prosesseissa käytettävää nestekaasua. Lähteessä KTM (2005) mainittiin tehtaan energia-analyyssissä havaittuina energiankäytön tehostamispotentiaaleina noin 1 % sähköstä ja noin 4 % lämmöstä. Yhtiön asiantuntijoiden arvion mukaan realistinen CO₂-päästöjen vähennystavoite olisi vain noin 1–2 % (KTM 2005), mutta on syytä korostaa, että näin suuren laitoksen tapauksessa tämäkin on erittäin merkittävä päästö määrä. Vähennyspotentiaali on voinut muuttua mm. voimalaitosinvestoinnin myötä. Taulukossa 4.6 esitettyjen lisääntyneiden päästöjen lisäksi myös tehtaan sähkönkulutus on kasvanut. Lähteen KTM (2005) arvion mukaan se olisi kasvanut vuonna 2005 noin 2,3 TWh:iin vuodessa. Nykyisin kulutus voi olla vieläkin suurempi.

Lähes pelkkää kierrätysterästä raaka-aineenaan käyttävän terästeollisuuden osuus terästuotannon päästöistä on melko pieni, eikä sitä siksi käsitellä tässä tarkemmin. Imatra Steelin kierrätysteräksen valmistusta on esitelty tarkemmin lähteessä KTM (2005). Siinä vähennyspotentiaaliksi mainittiin noin 3 % lämmöstä ja 2 % sähköstä. Verrattuna taulukossa 4.6 esitettyihin lukuihin uudelle EAF-prosessille (ilman valssausta), Imatran tehdas vaikuttaisi kuluttavan paljon energiaa tuotetonnia kohden. Näihinkin lukuihin vaikuttavat kuitenkin merkittävästi käytetyt rajaukset sekä raaka-aineiden että lopputuotteiden ominaisuudet.

Julkaisussa KTM (2005) mainitaan useaan kertaan kapasiteetin käyttöasteen vaikutus teollisuuden ominaispäästöihin ja energiankulutukseen. Kapasiteetin käyttöaste voi vaikuttaa molempiin suuntiin prosessista riippuen. Tuotanto voi toimia tehokkaimmin täydellä teholla ja ilman katkoja, jolloin ominaiskulutus ja -päästöt voivat olla pienet. Toisaalta, parhainta ja tehokkainta laitteistoa pyritään käyttämään eniten, ja siksi tuotantomäärien muuttuessa huonomman laitteiston käyttöä lisätään tai vähennetään. On hyvä muistaa, että lisääntynyt tuotanto yleensä lisää absoluuttisia päästöjä, vaikka se olisikin aiempaa tehokkaampaa.

Energiatehokkuuden kannalta olennaisessa osassa kaikenlaisessa terästeollisuudessa ovat hukkalämmöt ja niiden parempi hyödyntäminen. Terästehtailla on tunnetusti käyttämättä paljon hukkalämpöä myös verrattain korkeissa lämpötilatasoissa. Näiden käytössä ongelmana on ollut lähinnä sopivien käyttökohteiden löytäminen. Lämpöä voitaisiin mahdollisesti käyttää esimerkiksi tilojen lämmitykseen, kaukolämmitykseen, esilämmityksiin tai jopa polttoaineiden tai sahatavaran kuivaukseen, jolloin hukkalämmöt korvaisivat näihin nykyisin käytettäviä polttoaineita. Biopolttoaineiden kuivauksesta saatavia muita hyötyjä on esitetty tässä julkaisussa aiemmin, kappaleessa 3.3.1. Myös muita mahdollisia hukkalämpöjen käyttökohteita ilmastovaikutuksineen olisi syytä tutkia.

4.4.1 Pitkän aikavälin ennuste terästeollisuudesta

Terästeollisuuden tuotanto seuraa mm. rakennusteollisuuden kehitystä. Jos tuotanto kasvaa voimakkaasti, ylittyy nykyisten tehtaiden kapasiteetti ja niitä laajennetaan tai uusia rakennetaan. Jos tuotannon pullonkauloja voidaan poistaa osaprosessien laajennuksilla, ei tarvitse investoida koko tuotantolinjaan. Tällöin toimitaan olemassa olevan prosessin ehdoilla. Tuotantoa voidaan kasvattaa myös kokonaan uudella tuotantolinjalla tai uudella tehtaalla. Tällöin on mahdollista käyttää erilaisia markkinoilla olevia teknologioita.

Raskaassa teollisuudessa tuotantokatkokset tulevat kalliiksi. Uudistukset pyritään usein tekemään normaalien seisokkien yhteydessä. Mikäli investointi on suurempi ja on olemassa merkittävä riski, ettei uudistusta saada toteutettua normaalin seisokin aikana, voi kannattavakin investointi jäädä siksi toteuttamatta. Samoin, jos on riski, että uusi investointi voi myöhemmin haitata prosessia tai jäädä tuotannon pullonkaulaksi, se voi jäädä toteuttamatta. Energiankulutuksen tai päästöjen vähentämisen kautta saatu taloudellinen hyöty voi jäädä tuotantoon verrattuna niin pieneksi, että mitään riskejä mahdollisiin tuotantotappioihin ei oteta.

Edellä mainittujen syiden takia monimutkaisia terästehtaita tuskin tullaan täysin modernisoimaan. Kuitenkin esimerkiksi masuuneja täytyy peruskorjata tietyin väliajoin, jolloin suuremmatkin modernisoinnit olisivat mahdollisia. Myös Tornion terästehtaita on laajennettu ja modernisoitu pala kerrallaan jo useita kertoja. Pörssitiedotteiden mukaan lisäinvestointeja on yhä tulossa (Outokumpu 2008). Osaprosessien modernisoinnin yhteydessä voidaan tehdä pienempiä muutoksia ympäristöystävällisempään ja energiatehokkaaseen suuntaan. Tällaisia investointeja voisi tulla enemmän, mikäli niihin olisi saatavilla sopivia investointitukia. Päästöoikeuksien ja energiakustannusten kautta tulevat säästöt jäävät omistajille usein liian kauas tulevaisuuteen, sillä nykyisin investoinneilta vaaditaan erittäin lyhyitä takaisinmaksuaikoja. Ilmastonmuutoksen hillitseminen on kuitenkin vaadittuihin tuottoihin nähden pitkäjänteistä toimintaa, mikä aiheuttaa ilmastonmuutoksen hillintään hyvin keskeisen ongelman, taloudellisesti tuottavienkin keinojen verrattain hitaan takaisinmaksuajan. Korottuneet päästö- tai energiakustannukset puolestaan lisäävät riskiä tuotannon karkaamisesta päästökaupan ulkopuolelle, mikä on sekä kansantalouden että ilmastonmuutoksen kannalta erittäin haitallista. Vaikka uusintakin teknologiaa olevia tehtaita rakennettaisiin alueille, joissa energia on edullista ja kulttuuria sen tai ympäristön säästämiseksi ei ole, ominaispäästöt ja -kulutus kasvaisivat selvästi verrattuna esimerkiksi suomalaisiin tehtaisiin.

Kauempana tulevaisuudessa romurautaa lienee saatavilla selvästi nykyistä enemmän, jolloin valokaariuunit tulevat olemaan entistä suuremmassa roolissa globaalissa terästuotannossa. Tulevaisuuden investoinnit painottunevat näihin teknologioihin. Tulevai-

suudessa myös happirikkaamman ilman tai puhtaan hapen käyttö monenlaisissa prosesseissa yleistyneenä. Hukkalämpöjen nykyistä kattavampi hyödyntäminen lämmöksi ja jopa sähköksi voi tulla kannattavaksi terästeollisuudessa, jossa hukkalämpöjä on nykyisin käyttämättä myös korkeissa lämpötiloissa. Jos hukkalämmöistä saataisiin tuotettua sähköä, käyttökohteiden puutteesta aiheutuvaa ongelmaa ei olisi. Näiden keinojen lisäksi pitkällä aikavälillä tultaneen toteuttamaan useita edellisessä luvussa esitettyjä toimenpiteitä, kuten biomassan kaasutusta. Lähteessä VTT (2007) mainitaan potentiaalisena CO₂-vähennyskeinona myös rautamalmin elektrolyysi, joka on sähköintensiivinen prosessi ja jonka tutkimukseen ei ole merkittävästi panostettu ennen CO₂-päästökauppaa. Potentiaalinen energiansäästökohde olisi myös valaa aihiot mahdollisimman lähelle lopputuotteen muotoa. Optimaalisella valu+valssaus-yhdistelmällä voidaan saavuttaa energian ominaiskulutuksessa säästö, joka on lähes 2 GJ/tonni terästä (VTT 2007).

Happirikas poltto aiheuttaa suuren CO₂-pitoisuuden savukaasuihin hiiltä poltettaessa. Tällöin hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) voi olla kannattava vaihtoehto. CCS:ää on kuvattu tarkemmin kappaleessa 3.7. Myös terästeollisuudessa syntyviin häkkaasuihin ja niiden käyttöön voi olla kannattavaa soveltaa tunnettuja CCS-tekniikoita.

Jos tuotannon voimakkaan kasvun takia Suomeen rakennettaisiin uusi malmipohjaista raaka-ainetta käyttävä tehdas, se voitaisiin toteuttaa esim. suorapelkistysteknologioita hyödyntäen. Maakaasua olisi saatavilla Kaakkois- ja Etelä-Suomessa sekä tulevaisuudessa myös Turun suunnalla. Myös maakaasun saanti muualle Suomeen tai jopa puhtaan vedyn käyttö raudan pelkistämiseen on mahdollista pitkällä tähtäimellä. Lähteen VTT (2007) yhden skenaarion mukaan vuonna 2050 globaalista malmipohjaisesta teräksestä tultaisiin tuottamaan 15 % maakaasua käyttävillä DRI-prosesseilla, 10 % vetyä käyttävillä DRI-prosesseilla ja 10 % sulapelkistystä käyttäen ja BF+BOF-teknologia pysyisi edelleen vallitsevana teknologiana (59 %). Vetytaloudessa yleisestikin on olennaista huomioida myös vedyn valmistuksesta ja siirrosta aiheutuvat energiankulutukset ja päästöt.

Tulevaisuudessa laajempien kokonaisuuksien optimoiminen, esimerkiksi biopolttoaine- ja sahatavaraterminaalin integroiminen terästeollisuuden yhteyteen hyödyntämään runsaita hukkalämpöjä, voisi tuoda hyviä tuloksia kansallisia päästöjä ja polttoaineiden käyttöä ajatellen. Olennaista on, että saatavilla olevia teknologioita ratkaisuja saadaan laajasti käyttöön asti, sillä vasta siinä vaiheessa ominaispäästöt todella vähenevät. Koska uutta kapasiteettia todennäköisesti rakennetaan, tuotannon kasvu lisänee absoluuttisia CO₂-päästöjä, vaikka ominaispäästöjä saataisiinkin hieman pienennettyä. Tämän takia erittäin voimakas panostus päästöjen ja energiankulutuksen tehostamiseen on tarpeen.

4.5 Kemian perusteollisuus

Kemianteollisuus on tuotannon bruttoarvolla ja viennin arvolla mitattuna Suomen kolmanneksi suurin teollisuuden toimiala. Vuonna 2006 kemianteollisuuden bruttoarvo oli 16,8 miljardia euroa ja osuus teollisuustuotannosta 14 %. Tuotannon jalostusarvo oli vastaavasti 3,5 miljardia euroa. Kemianteollisuuden tuotannon bruttoarvosta kolmannes tulee öljytuotteista ja lähes kolmannes peruskemikaaleista. Peruskemikaalit oli jalostusarvoltaan eräs suurimmista tuoteryhmistä. Kemianteollisuuden viennin osuus oli lähes 14 % Suomen kokonaisviennistä. Euroopan kemianteollisuuden liikevaihdosta Suomen osuus on vain 1,1 %, mutta eräillä maamme yrityksillä joidenkin tuotteiden markkinaosuudet ovat merkittäviä myös maailmanlaajuisesti (Kemianteollisuus ry 2007).

Responsible Care -ohjelma (Vastuu huomisesta -ohjelma) on kemianteollisuuden kansainvälinen ympäristö-, terveys- ja turvallisuusohjelma, jonka Suomen toimintaa koordinoi Kemianteollisuus ry. Mukana on 52 maata ympäri maailmaa. Suomessa ohjelmaan on sitoutunut 105 yritystä kemianteollisuuden eri aloilta ja vuonna 2006 ohjelmassa mukana olleiden yritysten yhteenlaskettu tuotanto oli 28,6 miljoonaa tonnia ja henkilöstömäärä 19 300. Ohjelmaan sitoutuneiden yritysten tuotannon tonnimäärän osuus koko kemianteollisuuden tuotannosta oli yli 80 % ja henkilöstön osuus yli 60 % (Kemianteollisuus ry 2007).

4.5.1 Kemianteollisuuden kasvihuonekaasupäästöt

Kemianteollisuudessa merkittävät päästövähennykset on saatu aikaan vuonna 1992 aloitetun Responsible Care -ohjelman alkuaikoina. Positiivinen kehitys on edelleen jatkunut, ja siitä kertovat myös keskeisimmistä vesi- ja ilmapäästöistä kootut indeksit. Kasvihuonekaasujen päästöjä on kemianteollisuudessa seurattu toimialakohtaisesti vuodesta 1999 lähtien. Kyseinen vuosi on valittu muista poiketen myös indeksin pohjavuodeksi. Käytössä oleva lyhyt aikasarja ei vielä tarjoa selkeätä trendiä tulkittavaksi, mutta kemianteollisuuden kasvihuonekaasupäästöt näyttävät seuraavan kansallisten päästötietojen kehitystä (Kemianteollisuus ry 2007).

Kemianteollisuuden kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen osuus koko Suomen kasvihuonekaasujen päästöistä on alle 6 % (Motiva 2006). Responsible Care -ohjelmassa mukana olevien yritysten hiilidioksidipäästöt olivat vajaat 4,6 miljoonaa tonnia vuonna 2006. Laskua vuoteen 2005 on noin 2 %. Vertailuna mainittakoon Suomen kaikki hiilidioksidipäästöt, jotka ovat vuositasolla noin 70–80 miljoonaa tonnia (Tilastokeskus 2006). Hiilidioksidipäästöistä noin 40 % on prosessiperäistä, loput päästöistä syntyvät energiantuotannosta. Yritysten ostaman energian aiheuttamat epäsuorat hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2006 noin 1,8 miljoonaa hiilidioksiditonnia (Motiva 2006). Muiden kasvihuone-

kaasujen kuin hiilidioksidin päästöt olivat noin 6 400 tonnia (metaani eli CH₄ 2 100 tonnia ja typpioksiduuli eli N₂O 4 300 tonnia). Muiden kasvihuonekaasujen päästöt hiilidioksidiekvivalentiksi muunnettuna ovat yhteensä noin 1,4 miljoonaa tonnia. Muiden kasvihuonekaasujen päästöt laskivat noin 20 % vuoteen 2005 verrattuna (Tilastokeskus 2006).

Esimerkiksi typpihappo- ja adipiinihappotehtaiden typpioksiduulipäästöjen lasketaan olevan 5 % ihmisen toiminnan synnyttämästä N₂O-päästöstä. Kyseisten happojen valmistuksessa syntyvät päästöt ovat vähentyneet Pohjois-Amerikan, Japanin ja EU:n alueella 30 % vuodesta 1990 vuoteen 2000 saakka, mikä on osittain seurausta uusien NO-päästöjä kontrolloivien teknologioiden asentamisesta tuotantolaitoksiin vastaamaan sääntelyn vaatimuksia. Vuoteen 2020 mennessä on arvioitu typpihappo- ja adipiinihappotuotannoista aiheutuvien päästöjen kasvavan maailmanlaajuisesti. Kokemukset USA:ssa, Japanissa ja EU:ssa ovat osoittaneet, että 96 % adipiinihappotehtaan N₂O-päästöistä voidaan eliminoida hävittämällä yhdisteet korkeassa lämpötilassa. Vastaavasti kehitysmaissa 89 % typpihappotehtaan N₂O-päästöistä voidaan poistaa katalyyttisellä pelkistyksellä (US EPA 2006). Typpihappotehtaiden potentiaali vähentää N₂O-päästöjä voi vaihdella 70 % ja 100 % välillä riippuen katalyyteistä ja tehtaan toiminnasta (IPCC 2007).

4.5.2 Kemianteollisuuden energiankulutus

Vuonna 2006 kemianteollisuus käytti 6,6 TWh sähköenergiaa, joka on 7,4 % koko Suomen sähkönkulutuksesta (Tilastokeskus 2007). EK ja Energiateollisuus ry (2007) ennustavat kemianteollisuuden sähkönkulutuksen nousevan 8,3 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä, jos suotuisa talouden kehitys ja vakaa kasvu vallitsevat.

Suomessa kemianteollisuus – öljyjalosteet, epäorgaaniset kemikaalit, muut peruskemikaalit ja kumi- ja muovituotteet – kuluttivat vuonna 2004 sähkön (ks. 2006 arvo yllä) lisäksi 31,5 PJ lämpöä. Eksotermisistä reaktioista vapautui lämpöä noin 7,7 PJ, josta 1,7 PJ käytettiin sähköntuotantoon (VTT 2007). Prosessin reaktiolämpö on eksotermisen eli lämpöä vapauttavan kemiallisen reaktion sivutuote, jota ei ole sisällytetty minkään muun energialähteen kuluttamiseen (VTT 2007).

Kemianteollisuus on ollut kehityksensä alusta alkaen huomattavasti energiaa kuluttavaa, pääosin öljynjalostuksessa tarvittavan energian vuoksi. Muita energiaintensiivisiä kemianteollisuuden prosesseja ovat sähköenergiaa kuluttavat elektrolyytiset prosessit, esimerkiksi kloorikaasun tuotanto. Kemianteollisuuden prosessit vaihtelevat suuresti tuotettavasta kemikaalista riippuen. Joillekin kemian prosesseille on kuitenkin tyypillistä, että niissä muodostuvaa reaktiolämpöä hyödynnetään prosessin lämmitykseen tai sähkön- tuotantoon.

Kemiallisen teollisuuden prosesseissa sähköenergiaa tarvitaan elektrolyyttisiin prosesseihin, pumppaukseen, kompressointiin ja lämmitykseen. Höyryä tarvitaan yleensä kemiallisiin reaktioihin, haihduttamiseen, tislaukseen ja prosessivirtojen lämmittämiseen.

Responsible Care -ohjelmassa mukana olevien yritysten sähkön kulutus vuonna 2005 oli 5,8 TWh ja muun energian kulutus 17,4 TWh. Edelliseen vuoteen verrattuna sähkön kulutus kasvoi 7 % ja muun energian kulutus 3 %. Eri energian lähteiden yhteenlaskettu kulutus kasvoi noin 4 % vuoden 2005 tasosta. Tuotantomäärään suhteutettuna sähkön ja muun energian käyttö laski lähes 7 % (Kemianteollisuus ry 2007).

EU on sitoutunut nostamaan vuoteen 2020 mennessä uusiutuvan energian osuuden kolminkertaiseksi 20 %:iin, liikenteen biopolttoaineiden osuuden 10 %:iin sekä vähentämään kasvihuonekaasujen päästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta. Tämä kehityssuunta luo haasteita myös Suomen kemianteollisuudelle, jossa muutokseen on varauduttu ja on myös ryhdytty toimenpiteisiin mm. käynnistämällä biopolttoaineiden valmistus. Öljy on edelleen merkittävin energian lähde ja raaka-aine lähes kaikilla teollisen tuotannon aloilla, mutta siirtyminen öljystä riippumattomaan tuotantoon pakottaa etsimään uusia hiilen lähteitä, joita ovat uusiutuvat raaka-aineet, kuten viljeltyt kasvit, teollisuuden sivuvirrat sekä erilaiset kulutuksen, teollisuuden ja ympäristön tuottamat biomassat. Uudistuvien raaka-aineiden ja sivuvirtojen hyödyntäminen edellyttää uusia prosessikonsepteja, jotka voivat olla myös integroituneita primäärituotantolaitokseen tuottamassa lisäarvoa korkeamman jalostusasteen kemikaali- ja polttoainetuotteina. Kemikaalien tuotto biomassoista ja biologisten reaktioiden avulla säästää lisäksi energiaa ja vähentää päästöjä (Savolahti & Aaltonen 2006).

Vaikka kehityksen painopisteenä on uusiutuviin raaka-aine- ja energialähteisiin perustuvat teknologiat, tarvitaan myös perinteisten ja muiden tuotantomuotojen edelleen kehittämistä. Kemianteollisuudessa suurimpiin energiaa kuluttaviin toimintoihin voidaan lukea erilaiset erotusprosessit, kemialliset synteetit ja prosessien lämmittäminen. Sovellettaessa kuhunkin toimintoon edistyneitä uusia teknologioita on mahdollista säästää merkittävästi tuotannossa käytettävää energiaa. Tällaisia teknologioita ovat esimerkiksi membraaniavusteiset erotustekniikat, selektiiviset katalyytit kemiallisiin synteeseihin sekä kehittyneet integraatiomenetelmät vähentämään prosessien lämmitysvaatimuksia (Galitsky & Worrell 2004).

Teknologisia kehitysmahdollisuuksia:

- Membraaniavusteiset ja muut erotustekniikat
- Selektiiviset katalyytit ja biokatalyytit
- Kehittyneet integraatiomenetelmät.

Varovaisessa ja optimisessa perusskenaariossa voidaan olettaa lisäksi seuraavia yleisiä tehostamistoimenpiteitä:

- Yleinen prosessin optimointi
- Kehittyneemmät prosessinohjausmenetelmät ja säädöt
- Tehokkaammat moottorit, pumput ja vaihteet, taajuusmuuttajat, lämmönsiirtimet
- Oikea mitoitus.

4.5.3 Öljynjalostus

Kemiateollisuudessa öljynjalostus yksistään kulutti vuonna 2004 sähköenergiaa 0,9 TWh, lämpöä 12,7 PJ ja polttoaineita energiana 38,1 PJ, kun koko kemiateollisuudessa kulutus oli 6,4 TWh sähkönä, 31,5 PJ lämpönä ja 61,3 PJ polttoaineina. Vaikka öljynjalostuksessa on pääasiassa kyse polttoaineen tuotannosta, kuluttaa myös itse prosessi paljon energiaa. Öljynjalostamoissa osa tuotannosta ja sivuvirroista käytetään jalostamon oman energiatarpeen tyydyttämiseen, mikä vastaa noin 5 % raaka-aineestaan. Merkittävä määrä maamme petrokemiallisesta teollisuudesta toimii öljynjalostamojen yhteydessä tuottamassa erilaisia öljypohjaisia kemikaaleja ja tuotteita (VTT 2007).

Öljynjalostuksen suurin energiankuluttaja on raakaöljyn hydrokrakkausprosessi, jossa muodostuu vetyä, metaania, etaania, propaania sekä raskaampia hiilivedyn jakeita. Hydrokrakkauksen hiilidioksidipäästöjen arvioidaan olevan maailmassa vuositasolla 180 MtCO₂, mutta merkittäviin päästöjen vähentämisiin on useita keinoja. Krakkaus kuluttaa noin 65 % etaanin tuotannon kokonaisenergiasta, mutta hyödyntämällä edistyneempää teknologiaa, kuten krakkaustornin parempia materiaaleja ja kierrättämällä jo syötettyjä raaka-aineita, voidaan saavuttaa noin 20 %:n säästö kokonaisenergiassa. Syntynyt energiaylijäämä voidaan käyttää etaanin alhaisen lämpötilan tislaukseen ja kompressointiin. Jopa 15 %:n energiansäästö voidaan aikaansaada edistyneillä absorptioerotus- ja kompressointitekniikoilla. Nykyäänkin käytetty katalyyttinen krakkaus säästää jopa 20 % tuotannon kokonaisenergiasta (Ren et al. 2006).

Worrell ja Galitsky (2005) mainitsevat raportissaan yli 100 potentiaalisia energiansäästömahdollisuutta.

Teknologisia kehitysmahdollisuuksia:

- Krakkaustornin paremmat materiaalit ja jo syötettyjen raaka-aineiden kierrätys
- Edistyneet absorptioerotus- ja kompressointitekniikat
- Uusien katalyyttien käyttöönotto.

4.5.4 Lannoiteteollisuus

Lannoiteteollisuus käyttää noin 1,2 % koko maailman energiankulutuksesta, ja se on vastuussa lähes samansuuruisella osuudella kasvihuonekaasupäästöistä. Yli 90 % käytetystä energiasta kuluu ammoniakkin valmistukseen. Kuitenkin nykyiset tuotantolaitokset kuluttavat enää puolet 1960-luvun laitosten käyttämästä energiasta tuotantomäärään suhteutettuna. Uusimpien lannoitetehtaiden energiankulutus on luokkaa 28 GJ/tNH₃, joka lähestyy valmistusprosessin termodynaamista raja-arvoa (19 GJ/tNH₃), mikä ka-ventaa laitosten energiatehokkuuden kehittämismahdollisuuksia tulevaisuudessa (IPCC 2007).

Lannoiteteollisuudessa hiilidioksidipäästöjä voidaan edelleen merkittävästi vähentää, kun käytetään ammoniakkin valmistukseen nykyisen teknologian sijasta vetyä, jossa on vain vähän tai ei lainkaan hiiltä. Tällaista vetyä on saatavilla hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologialla (CCS, carbon dioxide capture and storage), biomassan kaasutuksella tai veden elektrolyysillä. Hyöty on suurin, jos tarvittava sähkö tuotetaan ydinvoimalla tai uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla. Suunnilleen puolet lannoitteiden ammoniakista reagoi hiilidioksidin kanssa, jolloin muodostuu ureaa. Ongelmaksi muodostuu se, että hiilidioksidi vapautuu edelleen, kun lannoite käytetään. Hiilidioksidin käyttö prosessissa vähentää CCS-teknologian potentiaalia (IPCC 2007).

Teknologisia kehitysmahdollisuuksia (kasvihuonekaasujen vähentämiseksi):

- Alhaisen hiilipitoisuuden omaavan tai hiilettömän vedyn käyttö ammoniakkin valmistuksessa
- Muurahaishappoteknologian edistäminen
- Biomassapohjaisten happojen valmistus ja hyödyntäminen biomassasta.

4.5.5 Muiden peruskemikaalien valmistus

Sellu- ja paperiteollisuus on suurin kemianteollisuuden asiakas Suomessa, ja paperikemikaalien tuotanto on osuudeltaan merkittävä. Kloorin kulutus on laskenut, koska sitä ei käytetä enää sellun valkaisuun. Kloori on korvattu klooridioksidilla, jota tuotetaan natriumkloraatista.

Lannoitteiden ohella myös erikoismuovit ja -kumituotteet, värit ja pigmentit, maalit ja lakat, pesuaineet ja hygienia tuotteet sekä lääkekemikaalit ovat merkittäviä Suomen kemianteollisuuden tuotteita.

Erityisesti peruskemikaalien tuotannossa sähköenergian tarve on suuri. Muovituotteiden ja teollisuuskaasujen tuotanto käyttää myös paljon sähköä, jälkimmäinen noin 13 % kaikesta Suomen kemianteollisuuden käyttämästä sähköenergiasta. Happojen valmistuksessa syntyy ylimääräistä lämpöä reaktion eksotermisyyden vuoksi. Typpihappotehaan yhteyteen on tavallisesti rakennettu voimalaitos, joka muuttaa ylimääräisen reaktiolämmön höyryksi ja sähköenergiaksi. Esimerkiksi typpihapon katalyyttisen valmistuksen lämmöntuotto on -2,6 GJ/t ja sähkönkulutus 170–250 kWh/t. Vertailuna mainittakoon öljytuotteiden valmistus, joka kuluttaa 2,2–2,5 GJ/t lämpöä ja 40–60 kWh/t sähköä (VTT 2007).

Bioteknologiaa voidaan hyödyntää käyttämällä luontoa kemian tehtaana, jossa tavantomaisia kemikaalien tuotantoprosesseja on mahdollista korvata hyödyntämällä mikro-organismeja ja entsyymejä. Ajatus ei ole uusi, koska kyseistä teknologiaa on hyödynnetty jo kauan esimerkiksi panimoteollisuudessa ja juustonvalmistuksessa. Uusi, ns. valkoinen bioteknologia etenee astetta pidemmälle. Se käyttää moderneja bioteknologian keinoja, kun kehitetään uusia tuotantomenetelmiä ja tuotteita, kuten perus- ja hienokemikaaleja, biomuoveja, ruoan lisäaineita sekä farmaseuttisen teollisuuden tarvitsemia lääkkeiden esiasteita. Bioteknologia on jo tehnyt mahdolliseksi tuottaa esim. detergenttejä, etanolia, sitruunahappoa ja aminohappoja, mutta lähitulevaisuudessa tullaan yhä enemmän korvaamaan petrokemiallisia prosesseja bioteknologialla. On arvioitu, että vuonna 2010 maailman kemianteollisuuden liikevaihdosta 20 % tulee olemaan peräisin valkoisesta bioteknologiasta. Myös kemian tuotantoprosesseissa tarvittavan energian arvioidaan vähenevän, koska bioteknologiassa ei vaadita yhtä korkeita reaktiopaineita ja -lämpötiloja kuin perinteisessä kemianteollisuudessa, vaan bioteknologiassa mikro-organismit ja entsyymit aktivoituvat huomattavasti miedommissa olosuhteissa. Bioteknologian etuja ovat muun muassa prosessien kontrolloitavuus ja selektiivisyys, mutta tehokkuuden osalta prosessit ovat vielä aikaa vieviä ja saannot vähäisiä.

Myös nanoteknologian on arvioitu mahdollistavan uudenlaisia ratkaisuja materiaalien valmistuksessa ja käytössä sekä integroituna tuotantoteknologiaan, mikä voi merkitä saastepäästöjen vähentämistä, luonnonvarojen järkevämpää käyttöä sekä haitallisten ympäristö- ja terveysvaikutusten minimoimista. Nanoteknologian avulla voidaan kehittää uusia ja suorituskykyisempiä prosesseja sekä niiden ohjaus- ja korjausjärjestelmiä, mikä edistää prosessien optimointia ja integraatiota. Kaupallisia nanoteknologian tuotteita on jo hyödynnetty kemianteollisuudessa prosessien katalyytteinä, nanorakenteisina pinnoitteina ja prosessien sensorirakenteissa. Nanoteknologian tutkimustoiminta on nykyään vilkasta ja uusia kaupallisia tuotteita on odotettavissa. (Chemical Industry Vision 2020)

Kemianteollisuudessa uusien tuotantoteknologioiden käyttöönoton arvioidaan tapahtuvan aikaisintaan vuonna 2030, ja vasta tämän jälkeen voidaan arvioida kasvihuonekaasujen päästöjen määrissä tapahtuvaa vähentymistä. Kuitenkin kemianteollisuuden tuotteiden

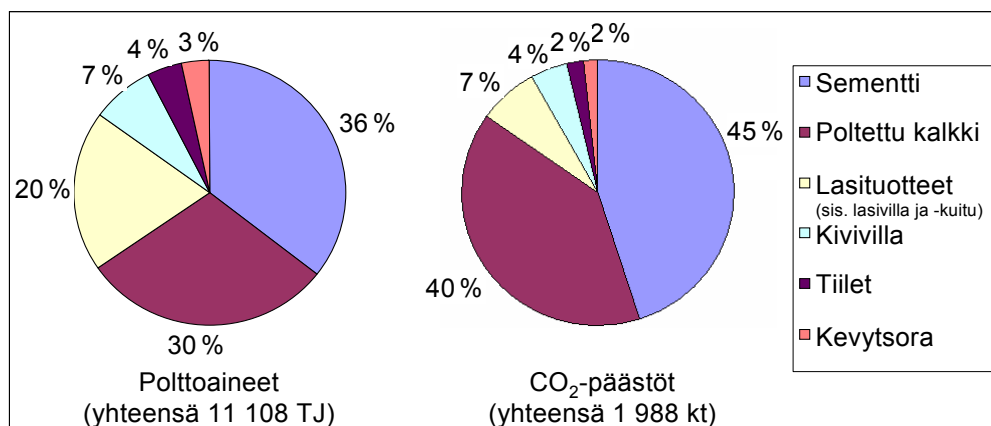
perinteisen valmistuksen CO₂-päästöjen vähentäminen nykytilanteessa on edelleen mahdollista, kun sovelletaan prosesseissa hiilidioksidin talteenottoteknologioita sekä hyödynnetään uusia energiaa ja raaka-aineita säästäviä integroituja teknologioita. Taulukossa 4.7 on esitetty teollisesti merkittävien kemikaalien valmistuksessa syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen vähennyspotentiaali ja sen kustannusvaikutus vuoteen 2030 mennessä. Taulukossa on oletettu, että jokaisella tuotantolaitoksella on käytössä paras ajanmukainen teknologia vuonna 2030 (IPCC 2007).

Taulukko 4.7. Kasvihuonekaasujen vähennyspotentiaali kemianteollisuudessa maailmassa, OECD-maissa, EIT-maissa ja kehittyvissä talouksissa perustuen IPCC:n skenaarioryhmiin A1 ja B2. A1-ryhmän skenaariot edustavat voimakasta taloudellista kasvua, matalaa väestön kasvua ja nopeaa uusien ja tehokkaampien teknologioiden käyttöönottoa. B2-ryhmän skenaariot edustavat kestävästä kehitystä ja lokaaleja toimintamalleja. Väestön kasvu on maltillista ja talous kasvaa kohtuullisesti, teknologiakehitys on hitaampaa ja moninaisempaa kuin A1-skenaarioissa (IPCC 2007).

Kemianteollisuuden tuote	Alue	Hiilidioksidin vähennyspotentiaali [%]	Vähennyksen kustannusarvio [US\$/tCO ₂ -eq]	Vähennyspotentiaali skenaario A1 [MtCO ₂ -eq/vuosi]	Vähennyspotentiaali skenaario B2 [MtCO ₂ -eq/vuosi]
Eteeni	Maailma	20	< 20	85	58
	OECD	20	< 20	35	40
	EIT-maat (EIT = economic in transition)	20	< 20	5	3
	Kehittyvät taloudet	20	< 20	45	15
Ammoniakki	Maailma	25	< 20	110	100
	OECD	25	< 20	11	10
	EIT-maat (EIT = economic in transition)	25	< 20	10	12
	Kehittyvät taloudet	25	< 20	87	80
Öljyjaloitteet	Maailma	10–20	0,5 < 20	150–300	140–280
	OECD	10–20	0,5 < 20	70–140	67–130
	EIT-maat (EIT = economic in transition)	10–20	0,5 < 20	12–24	12–24
	Kehittyvät taloudet	10–20	0,5 < 20	68–140	65–130

4.6 Mineraaliteollisuus

Tässä luvussa esitetään tiivis yhteenveto julkaisua (KTM 2005) varten tehdystä selvityksestä Suomen mineraaliteollisuuden osalta. Prosessien yksityiskohtia tai erityispiirteitä ei tässä selvityksessä kuitenkaan esitellä kattavasti. Kuvassa 4.2 on esitetty CO₂-päästöjen kannalta tärkeimpien mineraaliteollisuuden lopputuotteiden osuudet sektorin polttoaineiden kulutuksesta sekä CO₂-päästöistä. Esimerkiksi lasiteollisuus voidaan jakaa vielä tarkemmin eri lasituotteisiin, joilla on tuotteiden massaa kohden laskettuna hyvin erilaiset ominaiskulutukset ja -päästöt. Kuvassa käytetyissä tiedoissa eivät ole mukana sellutehtaiden meesauunit, eikä niitä käsitellä tässä julkaisussa muutenkaan mineraaliteollisuuden alla.



Kuva 4.2. Mineraaliteollisuuden lopputuotteiden osuudet polttoaineiden kulutuksesta ja CO₂-päästöistä lopputuotteittain (KTM 2005).

Kuvaa 4.2 tarkasteltaessa on tärkeää huomioida, että kulutukset ja päästöt on rajattu laitoksen mukaan. Kyseessä eivät siis ole tuotteiden elinkaarien päästöt, joiden arvioiminen on huomattavasti työläämpää. Esimerkiksi laitosten sähkönkulutukset eivät sisälly kuvan taustalla oleviin lukuihin kuten eivät myöskään muiden ostopanosten aiemmat kulutukset. Ulkopuolelta tulevat panokset taas saattavat poiketa huomattavasti laitoksittain. Siksi joidenkin tuotantoyksiköiden ominaiskulutukset ja -päästöt voivat poiketa toisistaan huomattavasti, vaikka elinkaarimielessä molempien tuotteet aiheuttaisivat likimain samansuuruiset kulutukset ja päästöt.

Suomessa merkittävimpiä mineraaliteollisuuden sähkönkuluttajia olivat 2000-luvun alkupuolella lasi- ja sementtiteollisuus noin 230 ja 140 GWh:n vuosikulutuksillaan (KTM 2005). Lopputuotteen massaa kohden lasketulta sähkön ominaiskulutukseltaan suurin on lasikuidun valmistus (1,94 MWh/t), jolla on myös massaa kohden laskettuna suurimmat CO₂-ominaispäästöt (1,17 tCO₂/t lasikuitua). Myös poltetun kalkin massaa kohden lasketut ominaispäästöt ovat huomattavan suuret muihin tässä käsiteltyihin mi-

neraaliteollisuuden tuotteisiin verrattuna (KTM 2005). Mineraaliteollisuuden erityispiirteinä kasvihuonekaasupäästöjen kannalta ovat raaka-aineista peräisin olevat CO₂-päästöt, jotka on huomioitu edellä vertailuissa luvuissa. Poikkeuksena tärkeimmistä lopputuotteista on lasikuitu, sillä sen valmistuslaitoksen CO₂-päästöt syntyvät Suomessa käytännössä kokonaan polttoaineista, koska tarvittava CaO ostetaan (KTM 2005).

Kuvasta 4.2 nähdään, että Suomen mineraaliteollisuuden KHK-päästöjen kannalta olennaisimmat alat ovat sementti- ja kalkkiteollisuus. Koska sähkönkulutuksen aiheuttamaa CO₂-päästöä ei ole huomioitu kuvan 4.2 CO₂-päästöissä, lasinvalmistuksen CO₂-päästö jää kuvassa verrattain pieneksi suuresta energiankulutuksesta huolimatta. Seuraavissa kappaleissa esitellään lyhyesti sementti- ja kalkkiteollisuuden prosessit sekä tärkeimpiä keinoja vähentää mineraalisektorin KHK-päästöjä. Tarkemmin näitä keinoja sekä prosesseja on käsitelty julkaisussa KTM (2005), johon verrattuna seuraavissa kappaleissa on kuitenkin päivitetty joitain tietoja. Merkittävin näistä on Lappeenrantaan vuonna 2007 valmistunut uusi tuotantoyksikkö. Edellä esitettyihin lukuihin (mm. kuva 4.2) näitä muutoksia ei ole huomioitu, vaan esitetyt luvut on otettu suoraan mainituista lähteistä. Tämän takia kuva 4.2 on vanhentunut, ja se on tulkittava vain suuntaa antavana. Suomessa mineraaliteollisuuden laitoksille on tyypillistä, että samaa tuotetta valmistaa vain muutama tai jopa vain yksi laitos. Siksi muutos yhden tehtaan prosessissa voi muuttaa koko alan tunnuslukuja Suomessa huomattavasti. Taulukossa 4.8 on esitetty tärkeimpien Suomen sementti- ja kalkkitehtaiden CO₂-päästöjä ja sähkönkulutuksia.

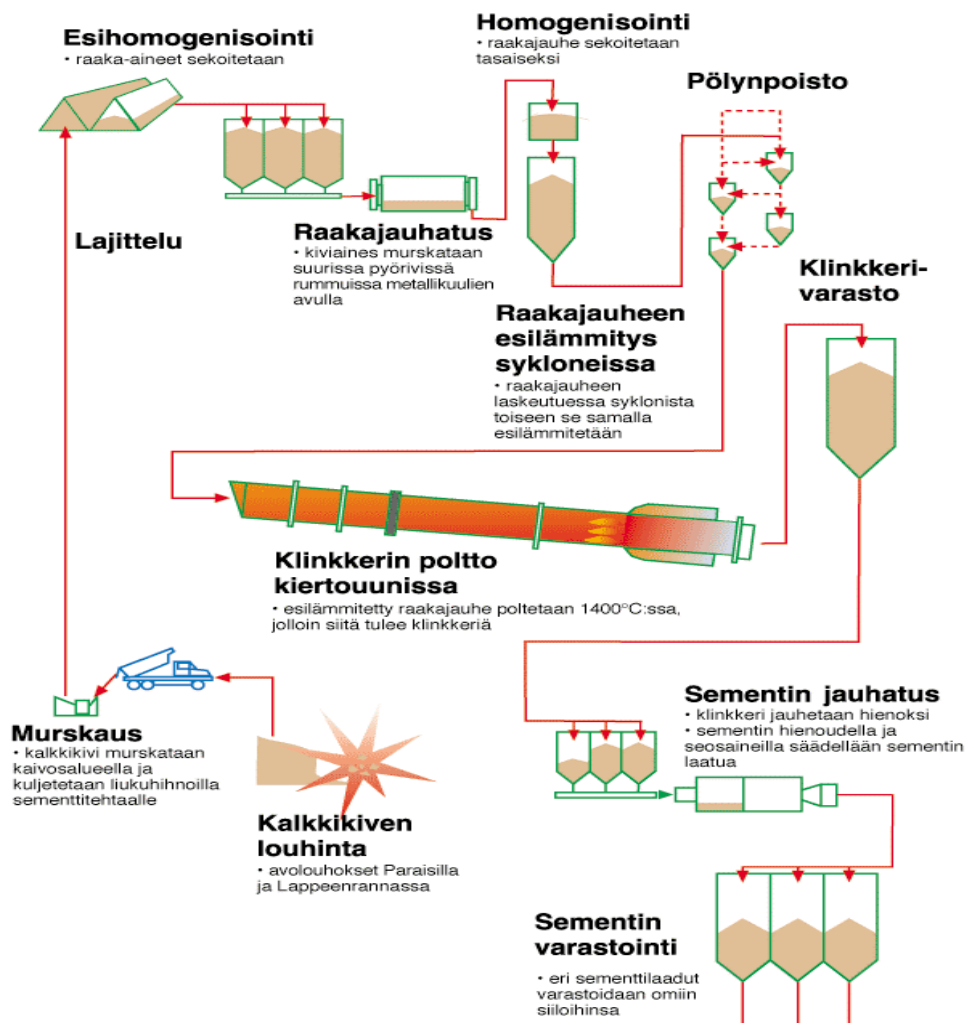
Taulukko 4.8. Suomen sementti- ja kalkkitehtaiden CO₂-päästöjä ja sähkönkulutuksia vuosilta 2002 (KTM 2005), 2005 ja 2006 (Päästöoikeustase 2006).

	CO ₂ [kt]	Sähkönkulutus TWh	CO ₂ [kt]	CO ₂ [kt]
	2002	2002	2005	2006
Lappeenrannan sementtitehdas	900	0.1	347	348
Paraisten sementtitehdas			574	614
Lappeenrannan kalkkitehdas	697	0.04	92	92
Louhen kalkkitehdas			66	65
Paraisten kalkkitehdas			90	96
Raahen kalkkitehdas			181	194
Tytyrin kalkkitehdas			175	192
Röyttän kalkkitehdas	110	?	115	136

Kuten teollisuudessa yleensäkin, myös mineraaliteollisuuden alojen ominaiskulutukset ja -päästöt ovat voimakkaasti riippuvaisia lopputuotteelta halutuista ominaisuuksista. Joitain ominaisuuksia määrätään mm. standardeissa, joten ainakin niiltä osin kulutuksiin ja päästöihin on mahdollista vaikuttaa ulkopuolelta. Muuten vaaditun laadun määrää hyvin pitkälti kysyntä. Ylilaatua ei kuitenkaan kannattaisi tehdä.

4.6.1 Sementin valmistus

Suomessa on kaksi sementtitehdasta, joissa molemmissa käytetään ns. kuivamenetelmää. Kuivamenetelmä on märkämenetelmää energiatehokkaampi sementin tuotantotapa, ja märkämenetelmästä onkin Suomessa kokonaan luovuttu. Kuvassa 4.3 on esitetty kaaviokuva sementin valmistuksesta kuivamenetelmällä. Energiatehokkuuden kannalta kuvasta puuttuu yksi olennainen komponentti, nimittäin Lappeenrannan tehtailla on käytössä savukaasujen lämmön talteenotto. Myös uunin jälkeinen klinkkerin jäähdytys nopeasti noin 200 °C lämpötilaan puuttuu kuvasta. Tästä lämpömäärästä osa voisi olla otettavissa hyötykäyttöön.



Kuva 4.3. Sementin valmistus kuivamenetelmällä (Finnsementti 2007).

Paraisten tehtaalla on yksi suuri kiertouuni ja Lappeenrannassa kaksi vanhaa ja uusi, vuonna 2007 valmistunut uuni (KTM 2005; Finnsementti 2007; Enemi 2006). Uuden yksikön myötä pienempi Lappeenrannan vanhoista uuneista on ajettu alas, ja toinen vanha uuni jää ympäristöluvan mukaan varalle. Lappeenrannan sementtitehtaan tuotanto

tulee olemaan noin 600 kt/a sementtiä, joka vastaa noin 512 kt/a klinkkeriä (Syke 2006). Vuonna 2006 tehtaan tuotanto oli noin 490 kt sementtiä (Finnsementti 2007). Sementin tuotanto Suomessa oli muutenkin kasvanut julkaisussa KTM (2005) esitetystä 1 194 kt:sta vuonna 2002 määrään 1540 kt vuonna 2006 (Finnsementti 2007), joten todennäköisesti tuotanto Suomessa uuden uunin valmistuttua tulee olemaan huomattavasti julkaisun KTM (2005) lukuja suurempi.

Sementin valmistuksen energiankulutus ja CO₂-päästöt eivät kuitenkaan kasva samassa suhteessa kuin tuotanto, sillä uusi yksikkö on uusinta teknologiaa, ja sen ominaiskulutus ja -päästöt ovat siten pienemmät kuin mm. korvatulla uunilla. Ympäristöluvan mukaan uuden uunin ominaislämpökulutus on noin 3 000 MJ/t klinkkeriä, kun se varalle jäävällä uunilla on ollut tasolla 3 900–4 000 MJ/t klinkkeriä ja vanhemmalla uunilla vieläkin enemmän (Syke 2006). Koko tehtaalla ominaiskulutus oli ennen uutta uunia noin 4 800 MJ/t klinkkeriä (KTM 2005). Vertailun vuoksi: maailmalla on vieläkin käytössä märkäuuneja, joiden ominaiskulutus on tasolla 6 000–6 300 MJ/t (Syke 2006). Uuden uunin pienempi ominaislämpökulutus perustuu ainakin sykloniesilämmitykseen sekä esikalsinointiin ja on BAT-tasoa. Koska prosessin pääpolttoaineina on käytetty (ja käytetään yhä) kivihiiltä ja petrokoksia, vähenevät myös CO₂-ominaispäästöt huomattavasti. Lappeenrannan tehtaan sähkönkulutus vuonna 2004 oli noin 115 kWh/t sementtiä (Syke 2006), joka on hieman kasvanut vuoden 2002 tasosta 109 kWh/tonni sementtiä (KTM 2005; Syke 2006). Sähkön kulutus tulee pääasiassa erilaisista myllyistä.

Lappeenrantaan vuonna 2002 rakennetulla lämmöntalteenottimella voidaan siirtää n. 14 000 MWh lämpöä vuodessa savukaasuista kaukolämpöverkkoon (Syke 2006). Kaukolämmön tuotannon polttoaineiden korvaaminen vähentää kansallisia CO₂-päästöjä. Lappeenrannassa sementtitehtaalla on mahdollista käyttää maakaasua sekä biopolttoaineita. Maakaasun käyttö ei ole kuitenkaan ollut taloudellisesti kannattavaa (Enemi 2006). Myös muita polttoaineita, esimerkiksi rengasjätettä, lihaluujauhoa ja jäteöljyjä, on käytetty Paraisten ja Lappeenrannan tehtaiden prosesseissa pienempiä määriä.

4.6.2 Poltetun kalkin valmistus

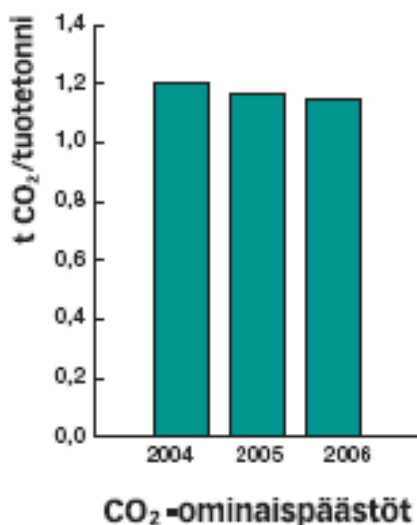
Kalkkia käytetään Suomessa useissa teollisuuden kohteissa sekä mm. maataloudessa. Louhoksista saatava kalkkikivi on enimmäkseen kalsiumkarbonaattia (CaCO₃), jota käytetään myös sellaisenaan, mutta usein siitä jalostetaan muita kalsiumyhdisteitä polttamalla se noin 1 100 °C:n lämpötilassa (KTM 2005; Nordkalk 2008). Tällöin CaCO₃ hajoo CaO:ksi (56 m-%) ja CO₂:ksi (44 m-%). Lisäksi käytetyistä hiilipitoisista polttoaineista syntyy hiilidioksidia. Kalsiumoksidista (CaO) voidaan edelleen valmistaa ns. sammutettua kalkkia eli kalsiumhydroksidia Ca(OH)₂. Merkittäviä kalkin polttajia Suomessa ovat sementtiteollisuus, selluteollisuuden meesauunit sekä erilliset kalkin-

polttamot. Näistä sementtiteollisuutta käsiteltiin erikseen edellisessä kappaleessa ja meesauunit käsitellään tässä julkaisussa metsäteollisuuden alla.

Suomessa poltettua kalkkia valmistaa markkinoille kaksi yhtiötä, Nordkalk Oyj ja SMA Saxo Mineral Oy. Tehtaita on kuudella paikkakunnalla ja niissä hyödynnetään tehtaasta riippuen rumpu- tai kuilu-uuniteknikkaa. Uusissa kaksoiskuilu-uuneissa täyttö, poltto ja tyhjennys tapahtuvat vuorotellen, ja tällöin toisen uunin savukaasut puhdistetaan tehokkaasti ohjaamalla ne toiseen uuniin panostetun kivimassan läpi. Samalla savukaasujen lämpö saadaan hyödynnettyä esilämmitykseen. Kaksoiskuilu-uunit ovat lähteen KTM (2005) mukaan ominaiskulutukseltaan energiatehokkaimmat uunit, ja Tornion Röyttän tehtaan kuilu-uunien ominaiskulutusta ja -päästöjä voidaankin pitää BAT-tasoisina.

Neljällä paikkakunnalla rumpu- ja kuilu-uunien hukkalämpöjä hyödynnetään myös kaukolämmön tuotantoon (Nordkalk 2006). Uunien polttoaineina Suomessa käytetään kivihiiltä, poltto- ja kierrätysöljyjä, maakaasua, nestekaasua sekä koksikaasua terästehtaiden yhteydessä olevilla tehtailla. Myös mm. petrokoksia on kokeiltu (Syke 2004). Polttoainevalikoimaa rajoittavat polttoaineiden tuhkapitoisuus ja epäpuhtaudet, jotka voivat siirtyä lopputuotteeseen ja huonontaa sen laatua.

Päästökaupan lisäksi myös molempien yhtiöiden osallistuminen vapaaehtoiseen KTM:n (nyk. TEM) ja teollisuuden väliseen energiansäästösopimukseen vaikuttaa yhtiöiden ominaispäästöihin ja energiankulutukseen. Kuvassa 4.4 on esimerkkinä Nordkalkin CO₂-ominaispäästöt vuosilta 2004–2006. Kuvasta näkyy loivasti laskeva trendi, joskin kuvassa näkymättömät vuoden 2003 CO₂-ominaispäästöt ovat olleet alle vuoden 2004 tason ja vuonna 2001 jopa hieman vuoden 2006 ominaispäästöjä pienemmät (Nordkalk 2005; Nordkalk 2002).



Kuva 4.4. Nordkalk Oyj:n CO₂-ominaispäästöt (Nordkalk 2006).

4.6.3 Yhteenveto mineraaliteollisuudesta

Myös mineraaliteollisuudessa on useita mahdollisuuksia vähentää CO₂-päästöjä. Yleisesti tällaisia ovat mm. polttoainesubstituutiot, raaka-ainesubstituutiot, paremman teknologian hyödyntäminen sekä jätelämpöjen hyödyntäminen prosesseissa tai kaukolämmöksi. Monimutkaisella teollisuudenalalla, jossa laitokset ovat Suomen tasolla yksilöitä, on mahdotonta osoittaa tehostamiskohteita tutustumatta laitoksiin huolellisesti ja yhteistyössä laitosten henkilökunnan kanssa. Tällaiseen ei kuitenkaan ollut tässä projektissa rahoitusta, joten ainakin tässä luvussa esitetyt lukuarvot ovat hyvin epävarmoja. Tämän selvityksen perusteella potentiaalisimmat kohteet tulisi vielä tarkastella yhteistyössä laitosten kanssa, ja lisäksi toimenpiteiden vaikutukset tulisi analysoida myös elinkaarinäkökulmasta ja kansalliset tai jopa globaalit päästövaikutukset huomioiden. Esimerkiksi suurempi seosaineiden määrä sementissä saattaa joissain kohteissa johtaa suurempaan sementin osuuteen betonin valmistuksessa, mikä saattaa jopa kumota sementin valmistuksessa saavutetun säästön energiankulutuksessa ja päästöissä sementtitonnin kohden. Myös tuotteiden kierrätettävyyden huomioon ottaminen on tärkeä. Lisäksi eri lähteistä poimitut luvut saattavat olla jo vanhentuneita, sillä viime vuosina mm. päästökauppa on kannustanut laitoksia toteuttamaan helpoimpia säästökohteita.

Yleisesti voidaan todeta, että energian ominaiskulutus ja ominaispäästöt riippuvat paljon halutusta lopputuotteen laadusta ja raaka-aineiden paikallisista ominaisuuksista (mm. epäpuhtaudet). Mikäli laatuvaatimuksia voidaan muuttaa, on usein mahdollista vähentää päästöjä enemmän kuin nykyvaatimuksilla. Toisaalta esimerkiksi tuotteiden käyttöikä saattaa lyhentyä ja siten päästöt lopulta jopa kasvaa alkuperäisen tuotteen elinkaareen verrattuna.

Sementin valmistuksesta syntyviä CO₂-päästöjä voidaan merkittävästi vähentää lisäämällä lisäaineiden määrää sementissä. Käytössä on useita eri lisäaineita, joista moni on muun teollisuuden sivutuotteita, kuten terästeollisuuden kuonaa tai polttolaitosten tuhkaa. Tämän takia monet lisäaineet ovat edullisia primääristen raaka-aineiden korvaajia, mutta ne kaikki vaikuttavat sementin laatuun, erityisesti kovettumisnopeuteen ja siksi niiden osuuksille on olemassa rajat myytävistä sementtilaaduista riippuen. Esimerkiksi kuonasementistä tehdyn betonin lujuus on kuitenkin kuivuttuaan erinomainen ja säilyvyys hyvä (KTM 2005). Joidenkin eri keinojen CO₂-päästövähennyspotentiaaleja sementti- ja kalkkiteollisuudesta on koottu taulukkoon 4.9, mutta useita esitellään periaatteen tasolla myös muualla tässä luvussa ja ne koskevat myös muita mineraaliteollisuuden aloja.

Nykyisten polttoaineiden korvaaminen maakaasulla vähentäisi CO₂-päästöjä huomattavasti mineraaliteollisuudessa. Maakaasua olisi jo nyt saatavilla mm. Lappeenrannassa ja Lohjalla. Turkuun suunniteltu maakaasuverkon laajennus (Gasum 2008) mahdollistaa teoriassa maakaasuun siirtymisen mm. Paraisten sementti- ja kalkkitehtailla.

CO₂-vähennyspotentiaaliltaan vielä maakaasua parempi vaihtoehto olisi biomassan tai jätejakeiden kaasuttaminen ja tuotekaasun käyttäminen sementti- ja kalkkiuuneissa. Nykyisin tuotekaasun puhtauden kanssa tehdään paljon kehitystyötä mm. kaasuturbiini- ja polttokennosovellusten takia, mutta teknologia lienee jo valmista kaasun syöttämiseksi sementti- ja kalkkiuuneihin (Tekes 2006). Mineraaliteollisuudessa on myös saatavilla paljon hukkalämpöä biomassan kuivaukseen, ja sitä voitaisiin hyödyntää vaikka biomassaa ei kyseisellä laitoksella käytettäisikään. Perinteisessä biomassan käytössä puun alkalimetallit aiheuttavat ongelmia, mutta kaasutuksen avulla tuhkaa ei tarvitse syöttää korkeisiin lämpötiloihin eikä sementin tai kalkin sekaan. Sementtiuuneissa voitaisiin polttaa paljon nykyistä enemmän rengasmurskaa, joka sisältää merkittävästi luonnonkumia ja on siten osittain uusiutuva polttoaine. Tällä hetkellä murskan saatavuus on ollut ongelma, koska se ajautuu haudattavaksi tienpohjiin ja meluvalleihin.

Tulevaisuudessa myös happipolton ja happirikkaamman ilman käytön mahdollisuuksia erilaisissa korkeita lämpötiloja vaativissa prosesseissa kannattaisi selvittää. Monet mineraaliteollisuuden prosesseista olisivat periaatteessa sopivia, ja ainakin tasolasin valmistuksessa happea käytetään jo nykyisin (KTM 2005). Ilman käyttäminen poltossa aiheuttaa NO_x-päästöjä ja on tavallaan energian tuhlausta, sillä ilman tilavuudesta lähes 80 % on tyypeä. Tämän typpimäärän lämmittämiseen käytetty energiamäärä hukataan savukaasujen mukana taivaalle. Hapen käyttö myös helpottaisi korkeiden lämpötilojen saavuttamista, mutta hapen erotukseen ja laitteisiin investoiminen ei ehkä ole vielä ollut kannattavaa. Potentiaalinen energian säästö on kuitenkin suuri, ja esimerkiksi terästehtaiden yhteydessä happitehtaita olisi jo valmiina.

Nykyisin käytetyissä teknologioissakin on selkeitä eroja. EU:n BAT-referenssiraporteissa (BREF 2001b) esitetään hyvin erilaisia lämmön ja sähkön ominaiskulutuksia erilaisille uunityypeille. Kalkkiteollisuudesta voidaan yleisesti todeta, että kiertouunit kuluttavat kuilu-uuneja enemmän energiaa (KTM 2005). Kuvan 4.4 perusteella voidaan arvioida Nordkalkin keskimääräiseksi CO₂-ominaispäästökseksi vuonna 2006 1,15 tCO₂/tCaO. Keskimääräinen energiankulutus oli 5,3 GJ/t CaO (Nordkalk 2006). SMA Saxo Mineralin Tornion tehtaille vastaavat luvut ovat 1,09 ja 4,0 (KTM 2005).

Kuten muissakin suurissa teollisuuslaitoksissa, myös mineraaliteollisuudessa on usein parannettavaa paineilmajärjestelmissä, prosessien ohjauksessa, säädöissä ja automaatiassa, hukkalämpöjen hyödyntämisessä, valaistuksissa sekä eristyksissä. Vaikka säästöpotentiaali näissä voi joskus jäädä laitoksen kokonaiskulutukseen nähden pieneksi, voi absoluuttinen päästövähennemä olla kuitenkin huomattavan suuri ja taloudellisesti kannattava. Lähteen KTM (2005) mukaan Nordkalkin Tytyrin tehtailla edellä mainituissa asioissa olisi saavutettavissa yhteensä noin 5 %:n säästö energian kulutuksessa. Jos vastaava potentiaali löytyy myös muilta Nordkalkin tehtailta, olisi vuosittainen säästö CO₂-päästöissä noin 11 kt (KTM 2005). Toteutettavissa oleva tekninen säästöpotentiaali lienee

vieläkin suurempi, mutta kustannukset kasvaisivat. Kierrätysmateriaalien käytön lisäämisellä olisi voimakas vaikutus päästöjen vähentämiseen erityisesti lasiteollisuudessa. Paljon kierrätyslasiä käyttävän lasivillateollisuuden CO₂-ominaispäästöt ovat vuorivillaa selvästi pienemmät.

Yleisesti tuotannot vaikuttavat hyvin olennaisesti päästöihin ja vähennyspotentiaaleihin. Tuotannon ja päästöjen kasvaessa myös vähennyspotentiaalit kasvavat. Kuitenkin myös kapasiteetin käyttöaste vaikuttaa teollisuuden ominaispäästöihin ja -energiankulutukseen. Tuotanto voi toimia tehokkaimmin täydellä teholla ja ilman katkoja, jolloin ominaiskulutus ja -päästöt voivat olla pienet. Toisaalta, parhainta ja tehokkainta laitteistoa pyritään käyttämään eniten ja siksi tuotantomäärien muuttuessa huonomman laitteiston käyttöä lisätään tai vähennetään.

Yleisesti kustannuksista löytyy vähän tietoa, ja vaikka sellaista löytyisikin, sen soveltaminen hyvin yksilöllisiin laitoksiin toisesta yksilöllisestä laitoksesta on hyvin kyseenalaista. Taulukkoon 4.9 voinee suuntaa antavasti soveltaa Lappeenrantaan hankitun sementtiuunin hintaa 25 M€ (Enemi 2006). Kokonaispotentiaaleja arvioitaessa on huomattava, että kaikkia potentiaaleja ei voi laskea yhteen, vaan yksi muutos vaikuttaa yleensä pienentävästi jäljelle jääviin potentiaaleihin.

Mineraaliteollisuudessa olisi mahdollista korvata polttoaineiden käyttöä sähköllä monissa kohteissa, erityisesti lasiteollisuudessa. Fossiilisia polttoaineita korvattaessa kyseisten laitosten CO₂-päästöt vähenisivät huomattavasti (KTM 2005). Lähteessä KTM (2005) päästövähennyspotentiaaleja käsiteltiin laitosten näkökulmasta, mikä on päästökaupan kannalta olennainen tapa. Ilmastovaikutusten arvioimisessa olennaista on kuitenkin käytetyn sähkön laskennallinen CO₂-päästökerroin. Siirtyminen sähkösulatukseen lisää sähkönkulutusta sähköverkossa. Tähän vastataan lisäämällä kulloinkin ns. marginaalissa olevaa sähkön tuotantoa, joka usein on CO₂-päästöiltään suurta lauhde- tuotantoa kivihiilellä. Samoin sähkönkäyttöä vähennettäessä marginaalisähkön tuotanto vähenee. Muun muassa kansallisten päästöjen kannalta ”oikea” kerroin arvioihin olisi siis usein marginaalisähkön päästökerroin. Tämä pätee, vaikka yhtiö ostaisi vesivoimalla tuotettua sähköä ”päästövapaana” sähkönä, sillä edullinen vesivoima käytettäisiin kyllä ilman tarkasteltavan yhtiönkin sähkönkäyttöä. Jos yhtiöllä on omaa sähköntuotantoa, joka riippuu muun prosessin tuotannosta, tilanne on hieman erilainen. Samoin kuin tapauksissa, joissa investointi voimalaitoksiin riippuu tarkasteltavasta prosessista, eikä sitä muuten toteutettaisi. Yleisesti ilmastovaikutustarkasteluissa olisi kuitenkin huomioitava marginaalisähkön CO₂-päästökerroin, joka poikkeaa huomattavasti keskimääräisestä sähkön CO₂-päästökertoimesta!

VTT:n sähkömarkkinamallin ja polttoaineiden päästökertoimien mukaan keskimääräinen marginaalisähkön päästökerroin (sisältäen polttoainetuotannon päästöt) vuosina

2004–2006 on ollut noin 226 t CO₂-ekv./TJ, kun taas maakaasulle vastaava kerroin on noin 68 t CO₂-ekv./TJ. Sähkösulatus on kuitenkin kaasusulatusa tehokkaampi (KTM 2005), joten todellinen ero ilmastovaikutuksissa ei ole aivan suoraan päästökertoimien mukainen, mutta maakaasusulatus vaikuttaisi olevan selvästi ilmastoystävällisempi. Korvattaessa koksia (polton päästökerroin 108 t CO₂/TJ) sähkösulatuksella ilmastovaikutuksien arviointia varten tarvittaisiin tarkempaa tarkastelua. Lisäksi marginaalisähkö muuttuu koko ajan, ja VTT:n mallilla olisikin mahdollista tarkastella myös marginaalisähkön aikadynamiikkaa, jonka avulla voisi tarkentaa laskelmia ja jopa ohjata kulutusta vähempipäästöiseen suuntaan.

4.6.4 Pitkän aikavälin ennuste mineraaliteollisuudesta

Suuri osa mineraaliteollisuuden CO₂-päästöistä aiheutuu raaka-aineen hajoamisreaktioista, joten niitä on hankala vähentää tuotantoa vähentämättä. Endotermiset reaktiot myös vaativat tietyn energiamäärän, jonka alle ei voi päästä raaka-aineita tai tuotteen ominaisuuksia muuttamatta. Kierrätysmateriaalien käytön maksimointi tulevaisuudessa koko kierrätysketjua parantamalla ja pullonkauloja poistamalla voisi vähentää energiankulutusta ja varsinkin päästöjä huomattavasti. On mahdollista, että erilaisia raaka-aineratkaisuja ja seoksia kehitetään korvaamaan nykyisiä raaka-aineita ja jopa lopputuotteita. Erityisesti tuotteiden korvaaminen vähemmän päästöjä aiheuttavilla voi johtaa suuriin vaikutuksiin ilmastomuutoksen hillinnässä. Myös edellä mainitut hukkalämpöjen hyötykäytön maksimoiminen, prosessin sisäisten virtojen sulkeminen, energiavirtojen tehokkaampi integroiminen sekä biomassan kaasuttaminen ja tuotekaasun käyttö prosesseissa vähentänevät tulevaisuudessa mineraalisektorin energiankulutusta ja CO₂-päästöjä.

Happipoltto tai happirikkaamman ilman käyttö poltossa sekä mahdollisesti jopa hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) voivat tulla laajasti käyttöön pitkällä aikavälillä. Karbonaattireaktioiden takia kalkin poltosta syntyvien savukaasujen CO₂-pitoisuus voi olla CCS:n kannalta houkutteleva. Korkeat lämpötilatasot tarjoavat myös mahdollisuuden yhdistää mineraaliteollisuuden prosesseihin sähköntuotantoa tai jotain muuta lämmön hyötykäyttöä. Tällaisiin investointeihin voitaisiin kannustaa sopivilla investointitukimuodoilla, sillä päästöoikeuksien ja energian kallistuminen voi ohjata tuotantoa tehokkaistakin laitoksista päästökaupan ulkopuolelle huonompiin laitoksiin. Olennaista on, että kokonaisuuden kannalta energiataloudellisesti järkeviin investointeihin kannustetaan, sillä erilaisia teknologisia ratkaisuja on ollut saatavilla jo vuosikymmeniä.

Taulukko 4.9. Eri keinojen päästövähennyspotentiaaleja sementti- ja kalkkiteollisuudesta.

	Ylä- raja	Yksikkö/selite	Realistinen	Yksikkö/selite	CO ₂ - vähennys	Yksikkö	Vähennys- pot. yläraja	Realistinen vähennyspot.
Sementti								
Seosaineiden osuuden lisääminen (mm. kuona ja tuhka)	80	% sementin painosta	30	% sementin painosta	0,9	t/ t kuonaa	1165	437
Polttoaineseoksen muuttaminen lihalujuuhon lisäämällä	300	TJ/a (lihalujuuhon saatavuus)			94	t/TJ	28	
Maakaasun käyttö polttoaineena	4623	TJ/a (sektorin suuntaa antava kulutus)	1536	TJ/a (Vain Lpr:n tehdas)	39	t/TJ	179	60
Biokaasun (kaasutettu tai kaatopaikkakaasu ¹⁾) käyttö pa:na	4623	TJ/a (sektorin suuntaa antava kulutus)	1536	TJ/a (Vain Lpr:n tehdas)	94	t/TJ	434	144
Polttoaineiden korvaaminen jättemateriaaleilla	50	% polttoaine- energiasta			40	t/TJ	92	
Uunien vaihtaminen leijupetiuneihin ²⁾	10	%:n vähennys sektorin CO ₂ :sta	10	%:n vähennys Paraisten CO ₂ :sta		%	108	75
Paraisten uunin korvaaminen BAT-tasoisella			500	MJ/t klinkkeriä vä- hennys	94	t/TJ		35
Kalkki								
Maakaasun käyttö polttoaineena	987	kt/a (sektorin tuotanto- kapasiteetti)	427	kt/a (Lpr:n ja Lohjan kapasiteetti)	31,7	t/TJ	160	72
Ominaiskulutukset Tornion tehtaan kulutuksen tasolle ³⁾	987	kt/a (sektorin tuotanto- kapasiteetti)	197	kt (Lpr:n kapasiteetti)	0,06	t CO ₂ / t CaO	59	12
Biokaasun (kaasutettu tai kaatopaikkakaasu) käyttö pa:na	987	kt/a (sektorin tuotanto- kapasiteetti)			86,7	t/TJ	438	

¹⁾ Kaatopaikkojen metaanipäästön vähentämiseksi saatava merkittävä hyöty jätetty tästä pois.

²⁾ Teknologian kypsyyden sementin valmistukseen epävarmaa.

³⁾ Useita keinoja.

Lähdeviitteet ja lisätietoja

BREF 2001a. Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. European Commission, December 2001.

BREF 2001b. Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries, December 2001.

CEPI 2006. Special Recycling 2005 Statistics. European Paper Industry hits new record in recycling.

Chemical Industry Vision 2020. Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials by Design: From Fundamentals to Function 2003. Chemical Industry Vision 2020 Technology Partnership. http://www.chemicalvision2020.org/pdfs/nano_roadmap.pdf.

EK ja Energiateollisuus ry. 2007. Arvio Suomen sähkön kysynnästä vuosille 2020 ja 2030. Marraskuu 2007. 20 s.

EK 2007. Elinkeinoelämän energiategokkuussopimus; yrityksen liittymisasiakirja puunjalostusteollisuuden toimenpideohjelmaan. 4.12.2007.
[http://www.motiva.fi/fi/toiminta/energia-jailmastosopimukset/ uudetenergiategokkuussopimukset2008---2016/](http://www.motiva.fi/fi/toiminta/energia-jailmastosopimukset/uudetenergiategokkuussopimukset2008---2016/).

Enemi 2006. Kauppa- ja teollisuusministeriö – Taustaselvitys päästökaupan vaikutuksesta mineraaliteollisuuden kilpailukykyyn. 1343. Enemi Oy, taustaselvitykset.

Energiateollisuus ry. 2008. Energiavuosi 2007 – sähkö. Lehdistötiedote 22.1.2008. <http://www.energia.fi/fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet>

Finni, T. 2004. Paperiteollisuuden energianäkymät ja niiden vaikutus paperinvalmistukseen. Pro gradu-tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Taloustieteiden tiedekunta. 74 s.+ liitteet.

Finnsementti 2007. Internet-sivut. www.finnsementti.fi.

Galitsky, C. & Worrell, E. 2004. Profile of the Chemical Industry in California. California Industries of the Future Program. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA. 53 s.

Gasum 2008. Internet-sivut. <http://www.gasum.fi>.

Hetemäki 2008. Paperinkulutus syöksyy alamäkeen. Kauppalehti 16.1.2008, s. 2.

Hetemäki, L., Harstela, P., Hynynen, J., Ilvesniemi, H. & Uusivuori, T. 2006. Suomen metsiin perustuva hyvinvointi 2015; Katsaus Suomen metsäalan kehitykseen ja tulevaisuuden vaihtoehtoihin. Metlan työraportteja n:o 26. 250 s. ISBN 978-951-40-2001-8. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2006/mwp026.pdf>.

IISI 2005. Steel: The Foundation of a Sustainable Future – Sustainability Report of the World Steel Industry 2005. International Iron and Steel Institute.

IPCC 2007. Fourth Assessment Report, Working Group III. Chemicals and Fertilizers. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>.

Kemianteollisuus ry 2007. <http://www.chemind.fi/toimialaraportti>.

KTM 2005. Teknologiaa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen – taustatyö kansallisen ilmastostrategian päivitystä varten. Toim. Ohlström, M. ja Savolainen, I. KTM Julkaisuja 1/2005, Energiaosasto.

Lerssi 2008. Ympäristöpäällikkö, Rautaruukki Oyj. Henkilökohtaiset keskustelut puhelimitse ja sähköpostilla tammikuussa 2008.

Lundén 2008. Alasajot nostavat voimalaitosten investointikynnystä. Kauppalehti 18.1.2008, s. 34.

Metsäklusteri 2006. Maailman johtavana metsäklusterina vuoteen 2030. Suomen metsäklusterin tutkimusstrategia. Suomen metsäklusteri ja sen asiakastoimialat. 39 s.

Metsäteollisuus ry 2007. Paperia ja Puuta – Suomesta paras toimintaympäristö metsäteollisuuden tuotannolle ja innovaatioille. 2.11.2007. 19 s.

Motiva 2006. Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet. Käytetyt kertoimet: sähkö 220 kgCO₂/MWh ja muu energia 226 kgCO₂/MWh.

Nordkalk 2002. Ympäristöraportti vuodelta 2002. <http://www.nordkalk.fi/default.asp?viewID=874>.

Nordkalk 2005. Ympäristöraportti vuodelta 2005. <http://www.nordkalk.fi/default.asp?viewID=874>.

Nordkalk 2006. Ympäristöraportti vuodelta 2006. <http://www.nordkalk.fi/default.asp?viewID=874>.

Nordkalk 2008. Internet-sivut. <http://www.nordkalk.fi>.

Outokumpu 2008. Outokumpu lisää ferriittisen ja kiiltohehkutetun ruostumattoman teräksen kapasiteettia – Tornioon yli 300 miljoonan euron investointi. Pörssitiedote 31.1.2008.

Päästöoikeustase 2006. Suomen laitoksilleen myöntämät päästöoikeudet ja todennetut päästöt EU:n CO₂-päästökaupassa.

Rautaruukki 2006. Ympäristöraportti vuodelta 2006.

Ren, T., Patel, M. & Blok, K. 2006. Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. *Energy* 31, s. 425–451.

Savolahti, P. & Aaltonen, O. 2006. Biojalostamo: Tulevaisuuden liiketoimintaa biomassoista. *Kemia-Kemi* 33, s. 32–34.

StatFin 2004. Teollisuuden rakennetilasto, tiedonhaku. Tilastokeskuksen StatFin web-tietokanta.

Syke 2004. Päätös Dnro 0596y0195-11 Nordkalkin Louhen kalkkitehtaan luvasta kokeilla kivihiilen osittaista korvaamista petrokoksilla.

Syke 2006. Päätös Dnro KAS2006Y101111 Finnsementin Lappeenrannan tehtaan ympäristöluvasta.

Tekes 2006. Kalkkiuunilla käytettävän kivihiilen korvaaminen kaasuttamalla jätepaperin ja muovin seosta. Projektin julkinen esittelymateriaali. www.tekes.fi.

Tilastokeskus 2003. Energiatilasto 2002. Yliopistopaino, Helsinki 2003. ISBN 952-467-243-X.

Tilastokeskus 2006. Energian hankinta ja kulutus, Kasvihuonekaasuinventaario. <http://www.stat.fi/til/ehkh/2006/index.html>, <http://www.stat.fi/til/khki/index.html>.

Tilastokeskus 2007. Energiankulutus 2006, taulukko 3: Energian loppukäyttö sektoreittain 1990–2006 ja taulukko 5: Sähkönkulutus sektoreittain 1990–2006. 12.12.2007. <http://www.stat.fi/til/ekul/2006/index.html>.

US EPA (United States Environmental Protection Agency) 2006: Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions (EPA Report 430-R-06-005). Office of Air and Radiation. Washington DC, USA.

VTT 2007. Energy Use, Visions and Technology Opportunities in Finland. Edita Prima. 234 s. ISBN 978-951-37-4742-8.

Wising, U. 2003. Process Integration in Model Kraft Pulp Mills; Technical, Economic and Environmental Implications. Väitöskirja. Chalmers University of Technology. Chalmers Reproservice. Göteborg. 80 s. ISBN 91-7291-337-1.

Worrell, E. & Galitsky, G. 2005. Energy Efficiency Improvement Opportunities for Petroleum Refineries – An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, CA, USA.

5. Liikennesektori ja työkoneet

5.1 Liikennejärjestelmä ja logistiikka

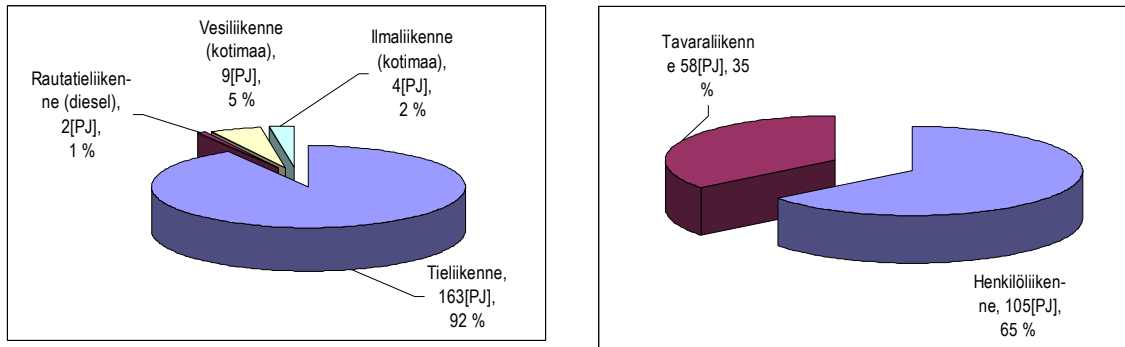
5.1.1 Liikennejärjestelmä osana yhteiskuntaa

Liikenne ei ole muusta yhteiskunnasta irrallinen ilmiö, vaan ns. johdettua kysyntää liikennejärjestelmän käyttäjien tarpeiden tyydyttämisestä eri paikoissa. Liikkuminen, kuljettaminen ja tietoliikenne palvelevat ihmisiä ja yrityksiä mahdollistamalla niiden toiminnat. Liikennejärjestelmä koostuu liikenneverkosta, liikennepalveluista, ohjaus- ja sääntelyjärjestelmistä, ajoneuvoista ja muusta kalustosta sekä terminaaleista. Liikenteen energiatehokkuuteen vaikuttavat itse liikennevälineiden ja polttoaineiden teknologioiden kehittymisen lisäksi monet yhteiskuntamme muut teknologiat ja niiden kehittyminen, etenkin liikenteen telematiikkajärjestelmät.

Muutokset yhteiskunnassa heijastuvat enemmän tai vähemmän suoraan liikenteeseen. Talouskasvun myötä kuljetusmäärät ovat kasvaneet, ja käytettävissä olevien tulojen kasvaessa ihmisten liikkuvuus kasvaa. Tuotantorakenteen muutosten seurauksena kuljetukset (raaka-aineet, välituotteet, lopputuotteet, jätteet jne.) eivät ole kasvaneet yhtä nopeasti kuin tuotannon arvo, vaikka tuotantorakenteen muutokset (kuljetusten ja varastoinnin ulkoistaminen, pitkät alihankkijaketjut, maailmanlaajuisesti hajautettu tuotanto, JOT-ajattelu) ovat omiaan lisäämään kuljettamista.

Ihmisten päivittäinen liikkuminen on pysynyt varsin vakaana jo vuosikymmeniä sekä liikkumiseen käytetyn ajan että matkojen lukumäärän suhteen. Matkanopeus ja matkojen pituudet ovat sen sijaan jatkuvasti kasvaneet autoistumisen ja liikennejärjestelmän kehittymisen myötä. Yhdyskuntarakenteen hajautuminen kaupunkiseuduilla pidentää erityisesti työmatkoja ja vaikeuttaa joukkoliikenteen tehokasta hyödyntämistä, mutta toisaalta aluerakenteen keskittyminen kaupunkiseuduille vähentää pitkiä matkoja yleisesti.

Valtaosa liikenteen käyttämästä energiasta kuluu tieliikenteessä (kuva 5.1). Tieliikenteessä kaksi kolmasosaa energiasta kuluu henkilöliikenteessä. Tieliikenteen henkilöliikenteen, ja siinä erityisesti henkilöautoliikenteen, valtava osuus (92 %) osoittaa liikenteen ensisijaisen energiansäästöpotentiaalin sijainnin.



Kuva 5.1. Suomen liikenteen energiankulutus petajouleina ja prosenttiosuuksina. (VTT LIPASTO 2006)

5.1.2 Liikenneinfrastruktuurin kehittäminen

Liikenneinfrastruktuuriin lasketaan kuuluviksi terminaalit, väylät sekä niillä liikennöintiin liittyvät telematiikkajärjestelmät. Maaliikenteessä väylät ovat teitä, katuja tai junaratoja, vesiliikenteessä merkittäviä reittejä, joita joskus ruoppaamalla myös parannetaan. Ilmaliikenteen väylät ovat ainoastaan suunnistus-, reititys- ja varoitusjärjestelmien avulla luotuja ”virtuaalikäytäviä”, mutta lentoliikenteen terminaalit hyvinkin merkittäviä, sillä niissä kytetään aina toisiinsa ilmaliikenne ja eri maaliikennemuodot, joiden yhteinen volyyymi varsinkin suurilla lentoasemilla voi olla hyvinkin mittavaa. Siksi lähes kaikkien suurien lentoterminaalien kehityssuunnitelmissa on mukana raideliikenteen kasvava hyödyntäminen.

Liikenneinfrastruktuurin kehittäminen on lähtenyt kahdesta perustavoitteesta, teollisuuden kilpailukyvyyn varmistavasta tavoitettavuudesta ja kuljetuskustannuksista sekä ruuhkautumisen poistamisen vaatiman kapasiteetin tarjoamisesta. Merkittävä liikenneinfrastruktuurin kehittämissuunta nykyään on erilaisten liikenne- ja matkakeskusten luominen niin tavarakuljetuksille kuin henkilöliikenteellekin tavoitteena helpottaa eri välineiden yhteiskäyttöä, ts. vaihtoja ja siirtoja.

Energiakysymykset ovat yksi osa kustannuksia, kun liikennehankkeiden hyötyjä arvioidaan päätöksentekotilanteissa. Nykyisillä valintakriteereillä kuljetus- ja matkustusaikoja lyhentävät ja liikenneturvallisuutta parantavat hankkeet saavat usein paremmat tunnusluvut kuin energian käyttöä tehostavat vaihtoehdot, varsinkin kun otetaan huomioon väylien rakentamisen energiankäyttö suhteessa saavutettaviin etuihin.

Liikenneverkkojen kapasiteetin lisääminen ja verkkojen laajentaminen eivät ole tehokkain tapa alentaa energiankulutusta pitkällä tähtäimellä, sillä seurauksena voi olla suoritteiden kasvua ja yhdyskuntarakenteen hajaantumista. Ruuhkien helpottumisesta seuraava polttoaineenkulutuksen pieneneminen syödään usein lisämatkojen syntymisen

kautta, sillä ruuhkaisuuden väheneminen laskee kynnystä esimerkiksi henkilöauton käyttöön ja näin heikentää joukkoliikenteen kilpailuasemaa. Joukkoliikenteellehän on varsin laajasti pystytty antamaan etuuksia (omat kaistat, liikennevalojen ohjaus jne.), joilla se ruuhka-aikanakin kykenee noudattamaan aikatauluaan.

Poikkeuksena ovat joukkoliikennettä tukevat hankkeet erityisesti tiheästi asutuilla kaupunkiseuduilla, jolloin luodaan edellytyksiä henkilöautoliikenteen vähentymiselle ja maankäytön tehostumiselle. Myös pitkillä matkoilla riittävän kysynnän omaavilla yhteysväleillä tulisi henkilöautolle kilpailukykyisen joukkoliikenteen kehittämiseen erityisesti panostaa, etenkin nyt suurten ikäluokkien ikääntyessä, jolloin energiankulutuksen alenemisen lisäksi alenisi onnettomuusriski, kun ikääntyvät kuljettajat vähentyisivät liikenteestä.

Raideliikennehankkeita puolustaa öljyn käytön korvautuminen sähköenergialla, vaikka usein hyödyt rajoittuvat bussiliikenteen korvautumiseen juna- tai metroluonteella, sillä henkilöautonkäyttäjien houkuttelemisen joukkoliikenteeseen ei yleensä onnistu suuressa mitassa ilman erityisiä liikennepoliittisia toimia.

5.1.3 Henkilöliikenteen vaihtoehdot

Henkilöliikenteessä energian kulutus ja päästöt ovat sidoksissa käytettyyn liikennevälineeseen. Matkustajakilometriä kohden sähköjuna on edullisin, lentokone taas eniten energiaa kuluttava. Erittäin tärkeää on kuitenkin riittävä kapasiteetin käyttöaste, sillä parin, kolmen hengen kuormalla henkilöauto on parempi kuin puolityhjä juna, koska junassa itse liikennevälineen massa on varsin suuri suhteessa hyötykuormaan eli matkustajiin, eikä energian kokonaiskulutus juuri riipu matkustajien määrästä. Junien hyvä energiatalous perustuu pitkälti ratojen pieniin korkeusvaihteluihin (sallitut nousut/laskut vain kymmenesosa maanteiden vastaavista) sekä häiriöttömämpään liikennöintiin, jolloin maantieliikenteessä tyypilliset, muun liikenteen huomioon ottamisen pakottamat nopeudenmuutokset jäävät pois.

Merkittävä tekijä energian kulutuksen kannalta on myös nopeus. Tavoiteltaessa matkaikeiden lyhenemistä joudutaan nopeuksia kasvattamaan, mikä lisää väistämättä energian kulutusta. Erilaiset tavat tehdä liikennevälineessä vietettävästä ajasta ”hyödyllisempää” voivat toimia siihen suuntaan, että matka-ajan pidentäminen (nopeuden ja energian kulutuksen alentamiseksi) voisi olla hyväksyttävää. Näihin kuuluvat mm. laajakaistaiset tietoliikenneyhteydet, jotka mahdollistavat niin työnteon matkan aikana kuin erilaisten viihdepalvelujen tarjonnan.

Vaikka henkilöliikenteeseen on periaatteessa useita vaihtoehtoja, ne eivät yleensä suinkaan ole kaikkien yksittäisten matkojen toteuttamisessa aidosti valinnaisia, vaan matkan

pituuden ja määränpäiden mukaan on kulloinkin vain muutama vaihtoehto tarjolla. Eri-laisten liikennevälineiden hallitulla yhteiskäytöllä voidaan kokonaisenergiankäyttöä kuitenkin pienentää, jos matkan eri vaiheissa voidaan käyttää kapasiteetiltaan ja muilta ominaisuuksiltaan edullisinta välinettä.

5.1.4 Logistiikka ja elinkeinoelämän kuljetukset

Nykyaikainen kulutus- ja investointihyödykkeiden valmistus perustuu pitkälle optimoituihin prosesseihin, joita ohjaavat tuotantorakenne ja tuotantomallit. Alihankkijaketjut muuttuvat yhä moniulotteisemmiksi. Prosessin olennaisen osan muodostavat hallitut, oikea-aikaiset ja häiriöttömät kuljetukset. Tehokkuuden tavoittelu johtaa usein osien ja puolivalmisteiden varastoinnin minimointiin, jolloin myös välituotteiden kuljettaminen lisääntyy. Tietyissä tuoteryhmissä lopputuotteen jakelun eräkoot pienentyvät täsmätarjonnan seurauksena kokonaiskysynnän silti muuttumatta. Tämä ei välttämättä lisää energian kulutusta, vaan jakelussa voidaan hyödyntää uuden teknologian tarjoamaa kevyempää ja vähäpäästöistä kalustoa.

Koska raaka-aineiden, osien, puolivalmisteiden tai hyödykkeiden kuljetus tuotantoprosessin eri vaiheissa on välttämätöntä, tulisi aina hyödyntää teknologian mahdollistamat välineet energiatehokkaaseen kuljettamiseen. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole mahdollista toimia ottaen huomioon yhteiskunnan kokonaisuhyöty. Esimerkiksi raideliikennettä ei voida vetää joka paikkaan vain tietynhetkisen kuljetustarpeen vuoksi, vaan myös kuorma- ja pakettiautoja tarvitaan kuljetusten hoitamiseen suurenkin kuljetusvoilymin ollessa kyseessä.

Kuljetusten merkitys tuotannon käynnissä pysymisen kannalta on noussut ratkaisevaan asemaan. Tämä on johtanut myös kuljetuskysynnän suuntautumiseen entistä nopeampiin kuljetuksiin, koska silloin myös markkinoiden ja kysynnän muutoksiin voidaan reagoida nopeammin. Kuten henkilöliikenteessäkin, nopeuden nostaminen johtaa yleensä energian käytön lisääntymiseen. Tieliikenteessä tätä voidaan hieman lieventää taloudellisen ajon koulutuksella. Energiatehokkuuden seuranta ja siitä tiedottaminen sekä energiansäästösopimukset sekä lisäävät tietoisuutta että myös käytännössä vähentävät energiaa turhaan kuluttavia kuljetuksia.

5.1.5 Liikenteen informaatiojärjestelmät ja muut telematiikkapalvelut

Tietoyhteiskunnan kehittyessä tieto- ja viestintäteknikan (Information and Communication Technology, ICT) eri sovelluksista on tullut osa arkipäivää, ja erityisesti liikennettä ja liikkumista palvelevia telematiikkajärjestelmiä (Intelligent Transport Systems and

Services, ITS) kehitetään jatkuvasti liikenteen mitä moninaisimmille osa-alueille. Niiden pääasiallinen tavoite on sujuvuuden ja liikenneturvallisuuden lisääminen sekä kulku- tai kuljetustavan valinnan ohjaus, mutta niillä voidaan osoittaa olevan välillisiä vaikutuksia myös energian käytön vähenemiseen.

Tietoyhteiskuntakehityksen vaikutus fyysisen liikenteeseen ei kuitenkaan ole suoraviivainen eikä helposti ennustettavissa, vaan hyvin moniulotteinen ja kompleksinen vuorovaikutussuhde, jonka kehityksen ennustamiseksi ei vielä ole riittävästi tutkimustietoa. Parhaimmillaan oikein ohjattuna ICT:n avulla voidaan saavuttaa suuriakin säästöjä liikenteen energiankulutuksessa, mutta uudet palvelut, keinot ja liikkumisen helppous voivat myös houkuttaa lisäämään liikkumista ja kuljettamista energiatehottomasti.

Liikennetelematiikkasovelluksiin, joilla voidaan laskea olevan energiankäyttöön liittyviä vaikutuksia, kuuluvat mm. älykkäät, reaaliaikaiset navigointi- ja reitinhakujärjestelmät, paikannusjärjestelmät ja tunnistusjärjestelmät, joilla voidaan lisätä sekä henkilöiden liikkumisen että yritysten kuljetusten tehokkuutta. Esimerkiksi multimodaalin reitinhakujärjestelmän ja ajantasaisen informaation avulla voidaan tukea ihmisten liikkumisessa energiatehokkaita valintoja ja auttaa autoilla liikkuvia välttämään ruuhkia ja löytämään pysäköintipaikka ilman kiertelyä tai optimoida yrityksen kuljetukset tehokkaasti niin etukäteen kuin myös reaaliajassa matkan aikana. Joukkoliikenteen uudet hallintomuodot, kuten kuljetusten ja matkojen yhdistelyjärjestelmät, mahdollistavat taloudellisen, energiatehokkaan ja toimivan vaihtoehdon kaikille osapuolille. Myös liikennevalo-ohjauksen optimointi, joka mukautuu vallitsevaan tilanteeseen, ja erityisesti joukkoliikenne-etuudet, parantavat liikenteen sujuvuutta ja pienentävät sen energiankulutusta, kun pysähdysten määrää voidaan vähentää. (Tulevaisuuden hybridiautoissa pysähdysten merkitys on kuitenkin vähäisempi, kun niissä liike-energiasta saadaan suuri osa talteen uudelleen käyttöä varten.) Toisaalta liikenteen sujuvuuden lisääntyminen johtaa usein ajonopeuksien kasvamiseen, mikä taas saattaa huonontaa energiataloutta.

Merkittävin vaikutus ICT:n käytöllä on liikkumistarpeiden vähenemisellä, sillä tietyissä yhteyksissä fyysistä liikkumista tai kuljettamista ei enää tarvita. Etätyö vähentää paitsi liikkumista etenkin pitkien työmatkojen osalta ja ruuhka-aikana, myös työpaikan energiankulutusta, sillä sama työpiste voidaan jakaa useammalle työntekijälle. Toisaalta säästämällä työmatkoissa jää aikaa muuhun matkustamiseen. Myös Internetin kautta tapahtuva kaupankäynti voi lisätä kuljetuksia, koska kuluttajat voivat hankkia tarvitsemaansa tuotteita vaikka toiselta puolelta maapalloa, ja yleensä tällaiset ostokset kuljetaan nopeina erilliskuljetuksina kuriiripalveluyritysten toimesta, eikä suinkaan esim. laivarahtina, jolloin energiankulutus kuljettua tonnia kohden on pienimmillään.

5.2 Ajoneuvo- ja polttoainetekniikan kehittyminen

5.2.1 Yleiset linjat

Liikenne- ja kuljetussuoritteet tuotetaan ajoneuvokalustolla, jonka ominaisuuksista pitkälti riippuu, paljonko energiaa kuluu ja CO₂-päästöjä siitä syntyy. Myös käytetty polttoaine vaikuttaa, sillä mitä enemmän polttoaineessa on vetyä suhteessa hiileen, sitä vähemmän syntyy CO₂-päästöjä. Liikenne on siis siinä määrin erikoinen energian käyttösektori, että se sähkövetoista raideliikennettä lukuun ottamatta on vastuussa myös oman käyttövoimansa tuotannosta, ja sille on rakentunut myös varsin pitkälle eriytynyt polttoaineiden tuotanto- ja jakeluinfrastruktuuri.

Tulevaisuutta ja kehitystä ajatellen, toisin kuin esimerkiksi voimantuotannossa, ajoneuvojen ja niiden moottorien valmistusta ja teknistä kehitystyötä ei tehdä Suomessa muille kuin laivamoottorikokoluokan moottoreille (Wärtsilä Diesel) ja työkonedieselmoottoreille (SisuDiesel). Suomi on siis lähes kokonaan sen kehityksen varassa, jota tehdään globaalien kulkuneuvo- ja moottorinvalmistajien toimesta ja jonka tuloksena syntyneitä tuotteita tarjotaan Suomen markkinoille. Liikennepolttoaineiden tilanne on siltä osin toisenlainen, sillä valtaosa Suomessa käytettävistä liikennepolttoaineista valmistetaan kotimaassa, ja kotimainen polttoaineteollisuus on kehitysintensiivistä ja edustaa alansa terävintä kärkeä. Niin kaikki fossiiliset kuin lyhyellä aikavälillä myös mahdolliset uusiutuvat raaka-aineet ja muut energianlähteet ovat kuitenkin tuontitavaraa.

Käyttövoiman tuotanto on liikenteen energiankäytön ja sen ympäristövaikutuksien syntymisen kannalta keskeinen tekijä. Jo noin sadan vuoden ajan autojen voimalaitteena on lähes yksinomaan käytetty mäntäpolttomootoria, jonka polttoaineena on ollut jokin raakaöljyjaloste, tavallisimmin bensiini tai dieselöljy, nykyisin lisääntyvässä määrin myös maa- tai nestekaasu. Tämä öljyriippuvuus on kenties liikennesektorin suurin haaste, kun fossiilisen hiilen päästöjä pyritään rajoittamaan ja korvaavien energianlähteiden osuutta lisäämään.

Mäntämoottoria on onnistuttu kehittämään jatkuvasti vastaamaan kulloisenkin ajankohdan sille asettamia vaatimuksia. Niistä tärkeimmät ovat nykyään varmasti vähäiset ympäristöpäästöt ja pieni energian kulutus, mutta myös käyttövarmuus ja edullinen hinta ovat koko ajan seuranneet mukana. Kulkuneuvoteollisuus on myös investoinut mäntämoottorien kehitykseen ja valmistukseen mittavia summia, ja se haluaa varmasti jatkaa näiden investointien hyväksikäyttöä vielä pitkälle tulevaisuuteen.

Varteenotettavaa kilpailijaa ei mäntämoottorille ole vielä ilmestynyt, vaikka esimerkiksi sähkökäyttöisten autojen historia on yhtä pitkä kuin polttomoottoriautojen. Pääsyy on selkeästi sähkön vaikea varastoitavuus. Nykyisten parhaidenkin akkujen tarjoama teho-

ja energiatiheys on vielä suhteellisen vaatimaton ja hinta korkea verrattuna nestemäisten hiilivetyjen vastaaviin arvoihin. Siksi akkusähköauto on toistaiseksi jäänyt vain marginaaliseksi erikoisuudeksi.

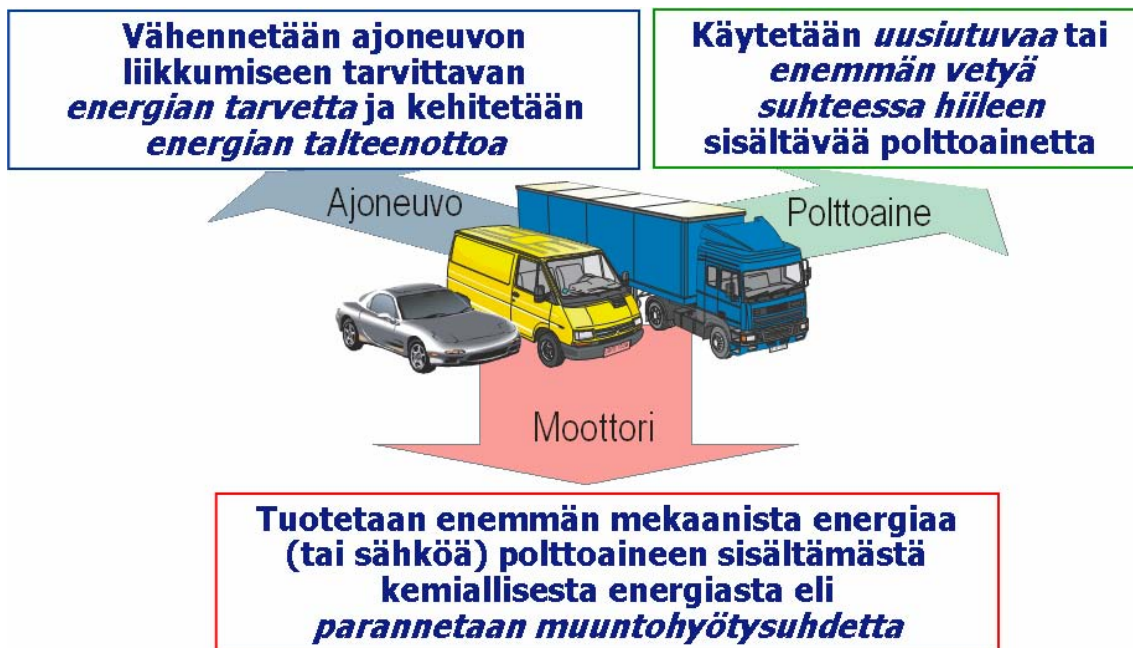
Uuden akkuteknologian, kuten litiumioniakkujen, kehitystyö on viime vuosina etenkin Yhdysvalloissa kuitenkin vienyt sähköautojen teknologiaa eteenpäin. Se on tuottanut uuden tuotekonseptin, ns. lataushybridin (”plug-in hybrid”), jossa yhdistyvät verkosta ladattava sähköauto ja polttomoottorihybridit uudella tavalla. Lataushybridit antaa noin 50–100 km toimintamatkan kertalatauksella (5–6 tuntia), ja lopusta toimintamatkasta huolehtii polttomoottori tavanomaiseen tapaan, ja se toimii myös akkujen lataajana.

Katalysaattorien ja muun pakokaasujen puhdistustekniikan onnistunut integrointi osaksi voimalaitetta on taas kyennyt ratkaisemaan mäntäpolttomoottorin toistaiseksi vaikeimman kompastuskiven eli haitallisten pakokaasupäästöjen hallinnan. Kun samalla raakaöljyn hintakehitys, ainakin pitkällä aikavälillä, on ollut varsin tasaista ja hinta suhteellisen edullinen, ei tarvetta vaihtoehtojen kehittämiseksi ole juuri ollut.

Tilanne alkaa kuitenkin hiljalleen muuttua. Vaikka puhdistinteknologia on osoittautunut tehokkaaksi, päästörajoitusten jatkuva kiristyminen on tehnyt jälkikäsitteilylaitteistosta koko ajan mutkikkaamman ja entistä kalliimman. Samalla kasvihuonekaasuille on tullut merkittävä vähennystarve, eikä niihin ole puhdistustekniikkaa, vaan siihen tarvitaan energian kulutuksen pienentämistä.

Moottoritekniikan jatkokehittäminen on kuitenkin vaikeaa, kun pakokaasujen puhtausvaatimukset jatkuvasti kiristyvät. Tämä on lisännyt mielenkiintoa tutkia kokonaan uusia vaihtoehtoja, joissa luontaiset päästöt olisivat vähäisemmät ja ennen kaikkea energiatalous parempi.

Ominaista liikennesektorille on myös toimijoiden runsaus, sillä varsinaisten palveluntuottajien lisäksi ja osin samoilla ”markkinoilla” toimivat yksityiset kuluttajat tuottaessaan omia liikenne- ja kuljetuspalvelujaan mm. käyttämällä henkilöautojaan. Tämä tekee alan säätelystä ja ohjauksesta varsin monimutkaista ja haastavaa.



Kuva 5.2. Liikennevälineiden energiatehokkuuden ja KHK-päästöjen vähentämiskeinoja. (VTT 2007)

5.2.2 Mäntämoottoritekniikan kehitysmahdollisuuksia

Periaatteessa polttomoottorin hyötysuhteen ja polttoainetalouden edelleen parantamiseksi on useita keinoja. Ne on kuitenkin lähes kaikki jo jossain määrin otettu käyttöön. Siksi samanlaista harppausta, joka nähtiin 1970-luvun öljykriisien jäljiltä, ei voi enää tapahtua, vaikka lähes koko 1990-luvun ajan polttoaineen kulutusta on edelleenkin pystytty vähentämään.

Avaintekijänä viimeaikaisessa kehityksessä on ollut tehokkaan, mikroprosessoritekniikkaan perustuvan ohjauksen ja säädön käyttöönotto sekä otto- että etenkin dieselmootto-reissa. Parantuvan säätötekniikan mukanaan tuomat mahdollisuudet perustuvatkin lähinnä moottorille syötettävän polttoainemäärän ja koko palamisprosessin entistä tarkempaan hallintaan liikennetilanteen mukaan nopeasti muuttuvissa kuormitustilanteissa. Säätöjärjestelmien nopeuden ja tehon koko ajan parantuessa mäntämoottorin säätö voidaan jo lähitulevaisuudessa optimoida jopa sylinterikohtaisesti, jolloin lopputulos paranee entisestään.

Dieselin hyvä polttoainetalous on tehnyt siitä niin houkuttelevan, että niissä maissa, joissa verotus kohtelee molempia polttoaineita likimain tasapäisesti, dieselin osuus henkilöauton moottoreissa on suuri ja koko ajan kasvussa. Myös Euroopan autonvalmistajat ovat painottaneet sen kehitystä tavoitellessaan malliston keskimääräisen hiilidioksidin-päästön alenemaa Euroopan komission kanssa vuonna 1998 tehdyn tavoitesopimuksen

mukaisesti (tavoite oli 140 g/km vuonna 2008). Läntisessä Euroopassa dieselmoottoristen autojen keskimääräinen osuus uusien henkilöautojen myynissä ylittikin 50 % pari vuotta sitten, kun se vielä 1997 oli runsaan 20 %:n tasolla.

Dieselautojen uusmyynissä merkittäviä maita ovat Saksa, Italia, Ranska ja Espanja, joissa jo melkein joka toinen uusi auto myydään dieselmoottorilla. Huippumaa on Itävalta, jossa dieselien osuus myynnistä on keskimäärin yli 80 %. Suomi on yhdessä Ruotsin kanssa edustanut toista laittaa. Ruotsissa dieselien myynti on liikkunut alle 10 %:n tasolla, Suomessa noin 15–20 %:n. Molemmat ovat nyt ottaneet merkittävät harppaukset, sillä Ruotsissa dieselosuus oli vuonna 2007 yli 35 %, ja Suomessakin yllettiin noin 30 %:iin. Vuoden 2008 alussa toimeenpannun autoverouudistuksen ennakoidaan nostavan dieselien myyntiosuuden Suomessakin yli 50 %:iin, koska autoveron (ja vuonna 2010 myös ajoneuvoveron eli vuotuisen käyttömaksun) määräytyminen CO₂-päästön mukaan suosii dieselautoja, joissa päästöt yleensä ovat vastaavia bensiinimoottorisia pienemmät.

Dieselmoottoreissa elektronisen säätötekniikan käytön lisäksi polttoaineen ruiskutuspaineen kasvattaminen on vallitseva kehityssuunta. Näiden avulla on tähän asti voitu täyttää vaatimukset päästöjen vähentämiseksi, ja samanaikaisesti pitää polttoainetalous hyvänä. Päästömääräysten kiristyminen EU:ssa vuonna 2009 (ns. EURO5) ja etenkin vuonna 2014 (EURO6) asettaa kuitenkin niin tiukkoja rajoja hiukkas- ja NO_x-päästöille, että niistä ei enää selvitä ilman tehokasta puhdistustekniikkaa. Kehitteillä on sekä typen oksideja pelkistäviä että hiukkasia suodattavia ratkaisuja. Ensimmäiset näistä ovat jo ehtineet kaupoissa ostettavissa oleviin autoihinkin, mutta uusia ja tehokkaampia vielä kehitetään. Silti dieselmoottorin kokonaistuotantokustannusten ennakoidaan kasvavan tulevalle vuosikymmenellä ja parantavan taas ottomoottorien kilpailukykyä, koska niissä pakokaasupäästöjen hallinta on kustannusvaikutuksiltaan pienemmässä roolissa.

Ajoneuvojen ja/tai niiden moottorien energian kulutukselle ei EU:ssa ole vielä mitään sovittua sitovaa raja-arvoa, vaan positiivista kehitystä pyritään edelleen viemään eteenpäin sopimuksilla ja tavoite-arvoilla. Uusin tavoite henkilöautoille on Euroopan parlamentin hyväksymä 130 g/km keskimääräinen CO₂-päästö, jonka tulisi toteutua uusien autojen myynissä vuoteen 2012 mennessä. Lisäksi tavoitellaan 10 g/km päästövähennemää erilaisilla muilla toimilla ja teknologioilla³. Näin saavutettaisiin alkuperäinen tavoitelukema⁴ 120 g/km. Edellisestä vaiheesta poiketen tavoite on nyt asetettu autonvalmistajaryhmittäisesti (ei yhteisesti koko alalle), jonka mukaan sitä seurataan, eikä enää vain jäsenmaiden osamarkkinoiden kautta. Tavoitteen täyttymättä jäämisestä on myös tarkoituksena periä sakkoja, jotka perustuvat autojen valmistusmääriin.

³ KOM(2007) 856 lopullinen

⁴ KOM(2007) 19

Perinteisten otto- ja dieselmoottorien rinnalle on myös kehitteillä aivan uusia prosesseja, mm. HCCI ("Homogenous Charge Compression Ignition"), jossa yhdistyvät otto- ja dieselprosessien ominaisuudet. Sille kehitetään myös ominaisuuksiltaan nykyisistä poikkeavia polttoaineita.

5.2.3 Hybridikäyttö parantaa moottorin toimintaa ja hyötysuhdetta

Tyypillisten liikennetilanteiden pakottamana ajoneuvomoottorin kuormitus muuttuu ajon aikana lähes jatkuvasti, ja moottorin toiminta joutuu pois siltä alueelta, jossa se on taloudellisinta. Vaihteiston ja voimansiirron optimoinnilla ja yhdistettäessä niiden ohjaus moottorin säätöelektronikkaan voidaan päästä lähemmäs moottorin polttoaineen kulutuksen kannalta edullisinta aluetta. Samoin jos henkilöautojen nykyisistä, osin jopa ylimitoitetuista suorituskykyvaatimuksista tingittäisiin, tultaisiin toimeen myös suhteellisesti pienemmällä moottorilla, joka toimisi suuremman osan ajasta korkeammalla kuormitustasolla ja siten myös paremmalla hyötysuhteella kuin suurikokoinen ja -tehoinen moottori.

Toinen kehityslinja pyrkiikin sovittamaan moottorin toiminnan entistä paremmin liikennetilanteen mukaan muuttuviin tehovaatimuksiin. Kun hitaasti ja tasaisesti ajettaessa tehontarve on hyvin pieni, voidaan osa sylintereistä kytkeä pois toiminnasta. Silloin käynnissä olevien sylinterien kuormitusaste nousee ja hyötysuhde paranee. Kun tehontarve taas kasvaa, lepuutetut sylinterit aktivoidaan. Tämä tekniikka soveltuu varsinkin suurien autojen monisylinterisiin moottoreihin, ja ensimmäiset käytännön sovellukset siitä ovat jo markkinoilla. Myös pienempien moottorien parissa tutkitaan mm. sähköisesti ohjattua venttiilikoneistoa, joka sallisi moottorin täytösasteen nykyistä paremman ja joustavamman säädön sekä sylinterien ajoittaisen käytöstä poissulkemisen.

Samaa tehonsäädön optimoinnin kehityslinjaa edustavat myös erilaiset ns. hybridikäytöt, joilla polttomoottori voidaan optimoida toimimaan aina parhaalla mahdollisella tavalla. Kun varsinainen voimanlähde, polttomoottori tai joissain tapauksissa jopa kaasuturbiini, erotetaan vetopyöristä sähköisen ajovoimansiirron avulla, voidaan moottoria kuormittaa aina riittävästi, tai joissain tilanteissa jopa sammuttaa se kokonaan. Samalla jäävät pois nopeat kuormituksen muutokset, jotka pahimmin haittaavat moottorin toimintaa. Käyttämällä moottorin rinnalla jotain energiavarastoa, kuten vaikkapa akkua, tullaan toimeen suhteellisesti ottaen pienemmällä moottorilla, kun energiavaraston puskurivaikutus tuo kiihdytystilanteessa lisävoimaa. Kokonaisyötysuhdetta parantaa edelleen mahdollisuus hidastuksissa ja jarrutuksissa ottaa talteen liike-energiaa, joka nykyisissä autoissa hukataan jarruissa lämmöksi.

Varsinaisten ”täyshybridien” rinnalle on tulossa myös malleja, joissa polttomoottorin toimintaa tehostetaan ja kulutusta vähennetään pienellä sähkömoottori-generaattori-yhdistelmällä. Niissä polttomoottori voidaan ajoittain, esimerkiksi katkonaisessa ruuhkaliikenteessä, pysäyttää, ja käynnistää hyvin nopeasti, kun liikennetilanne taas sallii liikkeellelähden. Sähkömoottorin kiihdytyksissä antaman avustuksen ansiosta tullaan myös toimeen pienemmällä polttomoottorilla. Polttoainetalouden parantuminen on luonnollisesti vähäisempää kuin täyshybrideissä, mutta vastaavasti valmistuskustannukset paljon pienemmät.

Hybridisähköautojen vaikutus sähköjärjestelmään

Sähköllä ladattava hybridisähköauto (PHEV, plug-in hybrid electric vehicle) luo mielenkiintoisia mahdollisuuksia. Usealla autonvalmistajalla on konsepti valmiina, esim. GM Volt, Opel E-flex, Volvo C30 Recharge.

Hybridisähköautolla on kaksi moottoria, joista toinen on sähkömoottori, toinen polttoaineella toimiva. Autolla voidaan yhdellä sähkölatauksella ajaa kohtalainen matka pelkästään sähkökäyttöisenä, esim. 50 km, jonka jälkeen ajetaan polttomoottorin avulla. Päivittäisenä ajomatkana 50 km edustaa kuitenkin jo huomattavaa osaa kokonaissuoritteista.

Sähkön kulutus on sähkömoodissa ajettaessa 0,2 kWh/km, eli 20 km:n matka vie 4 kWh. Suuri osa lyhytmatkaisesta säännöllisestä työmatkaliikenteestä voitaisiin vaivattomasti ajaa sähkökäyttöisenä, samoin kuin kauppa- ja asiointimatkat ja monet muut arkiajot, kuten lasten kuljettaminen harrastuksiin, sillä harvalla autolla päivittäinen ajomatka on yli 50 km, ja latausmahdollisuus työpaikoilla lisäksi sähköllä ajon osuutta.

Tilanteessa, jossa Suomessa käytettäisiin säännöllisesti 500 000 hybridisähköautoa työmatkaliikenteeseen (ajomatkana 20 km), olisi kokonaiskulutus 2 GWh aamupäivisin. Jos oletamme, että jokaisella olisi työpaikalla latausmahdollisuus ja että tämä energiamäärä haluttaisiin ladata takaisin akkuihin kotimatkan varmistamiseksi, lataus kestäisi 5 tuntia vakioteholla, jos latausjärjestelmä osaisi säädellä latausta sopivasti. Siten tarvittaisiin sähkötehoksi muutettuna 5 tunnin ajan 400 MW:n sähkötuotantoteho. Karkeasti arvioiden Suomen sähkönkulutus nousisi silloin noin 5 % ko. tunteina. Vuositasolla kukin auto ajaisi karkeasti laskien 10 000 km työmatkaliikennettä, mikä kattaisi jo yli 50 % nykyisestä keskimääräisestä henkilöautojen ajosuoritteesta. Siten 500 000 auton (noin 20 % nykyisestä henkilöautokannasta) työmatkoihin kuluisi sähköä 1 TWh, mikä on alle 1 % Suomen koko sähkökulutuksesta.

Yhden auton käyttämä sähkö saataisiin esim. talteen 20 m²:n aurinkosähköjärjestelmästä. Talvella saataisiin vähemmän aurinkosähköä, tosin talvella olisi muutenkin ajettava osittain polttoaineella sisätilojen lämmityksen takia, ellei pystytä kehittämään riittävän tehokkaita lämpöenergiaa varaavia ”lämpöakkuja”. Tuulivoima ja sähköautojen lataus on molempia hyödyntävä symbioosi. Sähköautojen latausnopeus voisi joustaa tuulivoimatuotannon mukaan, ja erityisesti nopea säätötarve hoituisi latausta säätämällä tai jopa hetkellisesti kääntämällä.

Voitaneen turvallisin mielin todeta, ettei nykypäivänä älykkään latausjärjestelmän suunnittelu ole mikään ongelma. Nykyiset lämmitystolpat kestävät hyvin hitaiden latausajojen alhaisia lataustehoja. Täyslataus (50 km) kestäisi 5–10 h. Oleellisinta kuitenkin on, ettei akuston tarvitse olla täyteen ladattu joka kerta liikkeelle lähtiessä, koska polttomoottori on aina käytettävissä.

5.2.4 Raskas kuljetuskalusto

Raskaassa kuljetuskalustossa ja linja-autoissa dieselmoottorin valta-asema on kiistaton. Voimakkaat rajoitustoimet haitallisten pakokaasupäästöjen rajoittamiseksi ovat osin haitanneet moottorien polttoainetalouden parantamista, mutta nykytilanteessa, kun suurin osa suurista valmistajista on ottanut käyttöön ulkoisen tyyppien oksidien jälkipuhdistuksen (SCR+urea), voidaan moottorin toiminta optimoida pitemmälle polttoainetalouden ehdoilla.

Merkittävämpiä potentiaaleja energian kulutuksen alentamiseen löytyykin itse ajoneuvon ja sen rakenteiden kehityksestä, joka on vasta alkutaipaleella. Taulukossa 5.1 on esitetty eräitä arvioita eri osakokonaisuuksien kehityspotentiaalista.

Taulukko 5.1. Arvioita raskaiden ajoneuvojen polttoainesäästöpotentiaaleista (RASTU 2007).

	Säästöarvio
Massa ja aerodynamiikka	30 %
Ajajan ohjeistaminen	20 %
Ajoneuvotyyppien väliset erot	5–15 %
Pyörät/renkaat	5 %
Perävaunutyyppi	3 %
Voiteluaineet	1–2 %

5.2.5 Polttokennosta 2000-luvun auton voimalaite

Hybridiautot, ja etenkin niihin kehitetyt sähköiset ajovoimansiirrot, tasoittavat tietä myös aivan uusille voimalaitteille. Tulevaisuuden hybridiautossa sähkö tuotetaan nykyisen polttomoottori-generaattoriyhdistelmän sijasta polttokennolla. Siinä vety yhtyy happeen synnyttäen sähkövirtaa. Koska reaktio toimii verrattain matalassa lämpötilassa ilman varsinaista palamisprosessia, ei siinä synny mitään haitallisia päästöjä, ainoastaan puhdasta vettä. Modulaarisen rakenteen ja siitä seuraavan helpon skaalattavuuden ansiosta polttokenno sopii yhtä lailla pieniin kuin suuriinkin autoihin. Siitä odotetaan tulevan ”tämän vuosituhannen voimalaite” ja vaihtoehto, joka lopullisesti syrjäyttäisi mäntämoottorit.

Polttokenno ei kuitenkaan ole parhaimmillaan todella suurissa, yli 200 kW:n yksiköissä, koska polttokenno on ”2D”-moottori, sillä siinä teho kasvaa suhteessa pinta-alaan, mutta mäntämoottori on ”3D-moottori”, eli teho kasvaa suhteessa tilavuuteen. Siten isotehoinen polttokennomoottori on paljon suurikokoisempi kuin mäntäpolttomoottori.

Pelkkä polttokenno ei toki yksinään riitä, vaan toimiakseen se vaatii joukon apulaitteita ja ohjausjärjestelmän, joka huolehtii prosessien valvonnasta ja ohjauksesta. Tuotekehittäjillä onkin haasteena laitteistojen pienentäminen ja integrointi niin, että ne saataisiin sijoitettua autoon ilman, että hyötytilavuutta joudutaan pienentämään.

Polttokennosähköautojen kehitystyöhön panostettiin autoteollisuudessa voimakkaasti 2000-luvun taitteessa. Kehitysoptimismi on sittemmin hieman laantunut, sillä vaikka polttokennon tehotehoisuus ja muukin tekninen suorituskyky on parantunut huomattavasti mittavien kehityspanostusten ansioista, on polttokennolla tuotettu teho vielä ainakin kymmenen kertaa kalliimpaa kuin nykyisillä mäntämoottoreilla, eikä hintaa aivan lähivuosina vielä saada kilpailukykyiselle tasolle massamarkkinoita ajatellen. Hintaa kertyy pääasiassa erilaisista katalyyttinä toimivista jalometalleista, joita tarvitaan vielä melkoisia määriä tavoitetasoon verrattuna. Myös konstruktion kehittäminen suursarjavalmistukseen hyvin sopivaksi on vasta alkuvaiheessa.

5.2.6 Polttoaineiden jakeluinfrastruktuuri

Rajoittavimmaksi tekijäksi kuin polttokennotekniikan kehittymättömyys tai kalleus on kuitenkin nousemassa polttoaineen jakeluinfrastruktuurin puuttuminen. Periaatteessa vetyjakelu olisi järjestettävissä useallakin eri tavalla, jotka voivat lisäksi olla toisiaan täydentäviä. Halvin vetyenergiayksikön hinta sekä paras energia- ja päästötase saavutettaisiin valmistamalla vetyä suurissa, keskitetyissä tuotantolaitoksissa nykyisten hiilivetyjalosteiden tapaan. Silloin raaka-aineena olisi todennäköisesti maakaasu, ja vetykaasu jaettaisiin putkiverkolla tai säiliöautoilla tankkausasemille. Aluksi vetyä voisi toimittaa öljynjalostusteollisuus, jolla on maailman suurin vedyntuotantokapasiteetti, ja jalostamoja sijaitsee monin paikoin varsin lähellä ensimmäisiä potentiaalisia vedyn käyttöalueita⁵.

Toinen, vähän vähemmän investointeja kerralla vaativa mutta kokonaisuhyötysuhteeltaan ja -taloudeltaan huonompi vaihtoehto olisi käyttää pieniä, jakeluasemille sijoitettavia reformeriyksiköitä, joissa vety myös tehtäisiin maakaasusta. Varsinkin tiheän maakaasuputkiverkon alueilla Euroopassa ja Yhdysvalloissa tämä olisi nopeammin ja pienemmin investoinnein toteutettavissa oleva vaihtoehto kuin vedyn keskitetty tuotanto. Lisäksi jo kaupallisella asteella oleva nesteytetyn maakaasun kuljetus- ja varastointiteknologia mahdollistaisi ”satelliittiasemien” perustamisen putkiverkon ulottumattomissa oleville alueille, mikä tekisi siitä jollain lailla toimivan myös Suomessa, jossa nykyinen maakaasuputki kattaa vain aivan eteläisen Suomen alueen.

⁵ J. Bentham; Shell

Kolmas vaihtoehto olisi vedyn hajautettu tuotanto elektrolyysilaitteilla joko asemilla tai periaatteessa jopa käyttäjäkohtaisilla laitteilla. Tällaisia on jo tarjollakin, mutta tässä toimintamallissa vetypolttoaineen hinta nousee kohtuuttoman korkeaksi, ja lisäksi se laajamittaiseksi kasvavana siirtää sähköverkon kuormitusta ”väärään päähän” eli etäälle tuotantoyksiköistä, jolloin energian siirtohäviöt huonontavat kokonaishyötysuhdetta. Kun myös elektrolyysiprosessin hyötysuhde olisi pienissä yksiköissä huono, kasvaisivat vedyn tuotannon aiheuttamat sekundääriset hiilidioksidi- ja muut päästöt varsin suuriksi, koska päästötöntä ja ei-fossiilista sähköenergiaa (ts. ydin-, vesi- tai tuulisähköä) ei ole kovin paljon saatavilla, vaan sähkön tuotannossa tukeuduttaisiin perinteisiin polttopohjaisiin tuotantotapoihin.

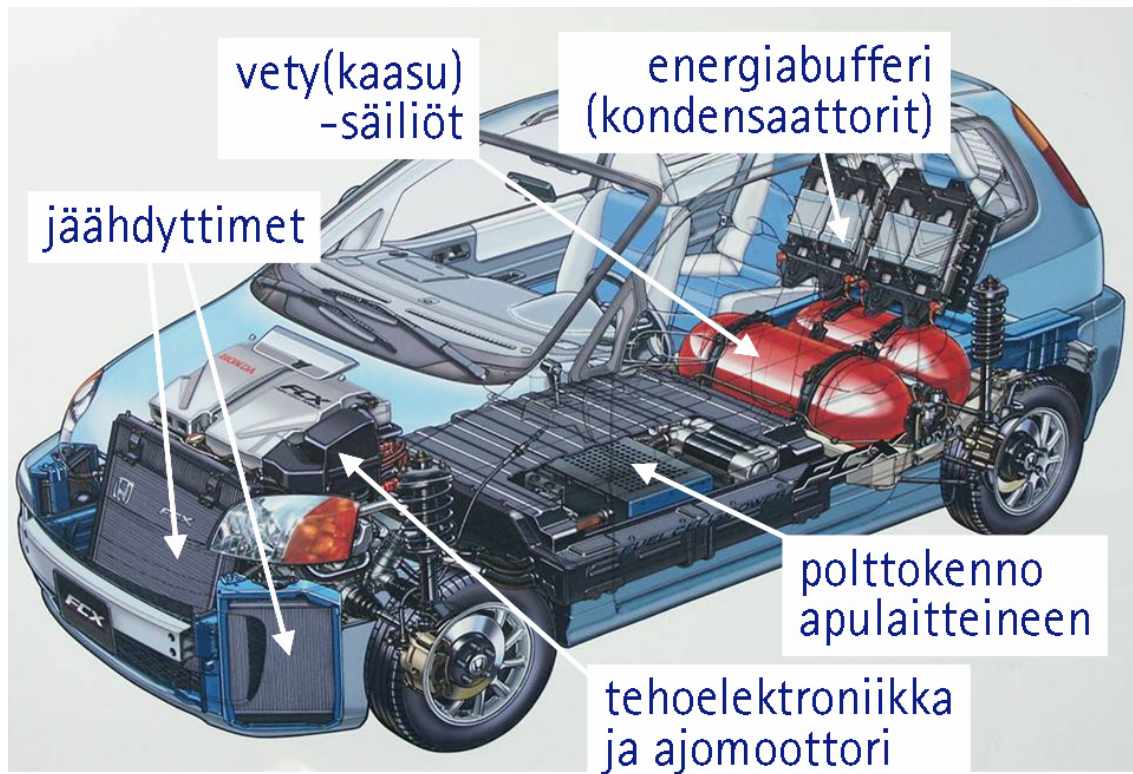
Toistaiseksi vedyn varastointi ajoneuvoissa tuottaa kuitenkin vielä vaikeuksia ja vaatii suuritulavuuksiset ja painavat säiliöt, jolloin hyötykuorman osuus pienenee ratkaisevasti. Vaikka intensiivisellä kehitystyöllä on pystytty varastoidun vedyn energiatiheyttä suhteessa painoon/tilavuuteen parantamaan, ei vielä olla lähelläkään nestemäisten polttoainneiden tarjoamia suoritusarvoja.

Vety sopii periaatteessa myös mäntäpolttomoottorin polttoaineeksi. BMW on jo rakentanut muutamia prototyyppiautoja ja suunnittelee vakavissaan sarjatuotannon aloittamista noin viiden vuoden kuluessa. Myös Ford ja sen kanssa liitossa oleva Mazda tutkivat tätä vaihtoehtoa aktiivisesti osana tulevaisuuden voimalaiteratkaisujen kehittämistä. Mäntämoottorikäyttö voisikin tarjota polttokennoautoja nopeammin laajenevan kysyntäpohjan vety-polttoaineelle, ja siten edesauttaisi sen jakeluinfraktuurin kannattavaa rakentamista.

5.2.7 Polttokennoautojen markkinoilletulo ja penetraatio

Kilpailu polttokennokäyttöisen auton kehittämisestä ja markkinoille tuomisesta on tällä hetkellä varsin suuren mielenkiinnon kohteena. Kaikilla isoilla autoyhtiöillä on jonkinlaiset kehitysohjelmat, ja optimismi autojen sarjavalmistuksen aloittamisesta oli varsin suuri vielä viisi vuotta sitten. Nyt optimismi on hieman taantunut, ja realismi astunut sijalle. Toistaiseksi puhutaan vielä varsin vaatimattomista tuotantoluvuista: kumulatiivisesti ja maailmanlaajuisesti on tuotettu ehkä runsaat 500 yksikköä, ja nämäkin ovat vielä tarkoin valituissa kenttäkokeissa, eivät varsinaisilla loppukäyttäjillä.

Useimmat autoyhtiöt pitävät tärkeimpinä haasteina korkeita valmistuskustannuksia ja toisaalta puuttuvaa vedyn jakeluinfraktuuria. Kustannusten tulee alentua noin kymmenesosaan ennen kuin edes pienimittakaavainen tuotanto ja kaupallinen toiminta ovat mahdollisia. Toisaalta perinteisempien polttomoottori-hybridiautojen kohdalla kustannustaso on noin kymmenessä vuodessa alentunut alle puoleen, joten aivan ylivoimaisesta haasteesta ei ole kysymys, ja polttokennon rakenteen kehittyminen vie koko ajan suursarjatuotantoon sopivampaan suuntaan, minkä pitäisi alentaa loppuhintaa merkittävästi.



Kuva 5.3. Polttokennoauton rakennekuva, Honda FCX. (VTT 2007, lähde: Honda)

Pisimmällä kuluttajille tarjottavien autojen kehityksessä on Honda, joka marraskuussa 2007 julkaistujen uutisten mukaan on tuomassa pienet sarjat koekäyttöön Kaliforniassa kesällä 2008. Autojen määrää ei kuitenkaan ole vielä julkistettu, mutta leasing-hinta on 600 USD/kk. ”Pakettiin” kuuluu myös tarvittaessa vedyntuotantoyksikkö ”Honda Home Energy Station”, mutta siitä perittäneen lisämaksua.



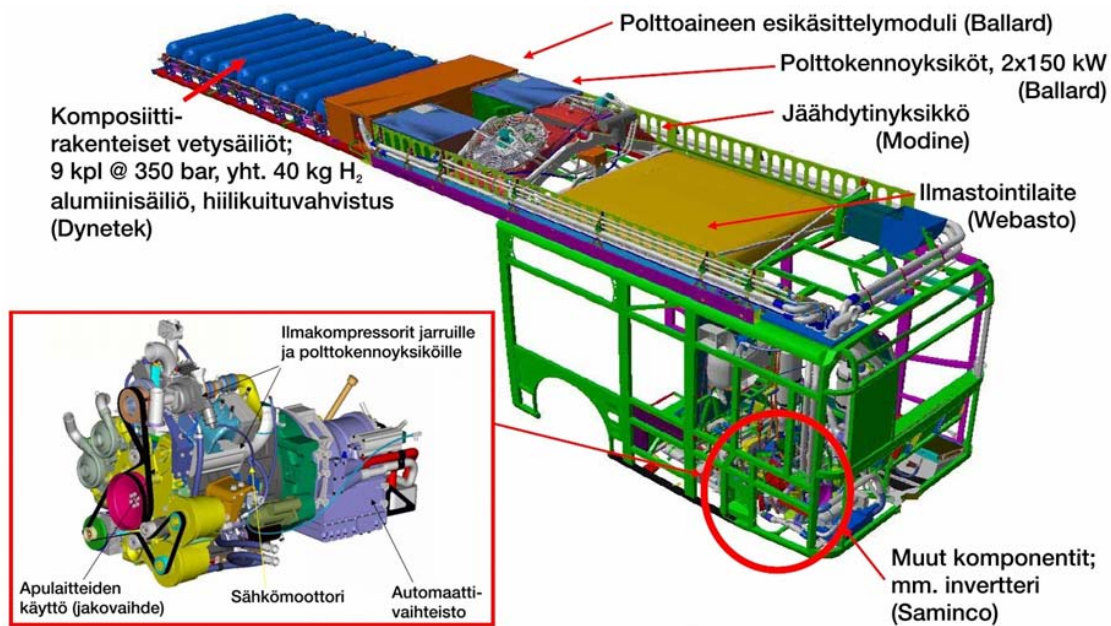
Kuva 5.4. Honda FCX Clarity ja "Home Energy Station"-vedyntuotantoyksikkö. (Honda 2007)

Polttokennotekniikan kehitys etenee myös kaupunkibusseissa, joissa sitä on kokeiltu pisimpään Pohjois-Amerikassa, jossa busseja on ollut koekäytössä yhteensä muutama kymmenen autoa 1990-luvun lopulta lähtien.

Euroopassa bussikehitystyötä on tehnyt voimakkaimmin DaimlerChrysler (Evobus) tukenaan EU:n rahoittama CUTE-projekti, jossa yhteensä 27 vetypolttokennobussia oli koekäytössä 2003–2006 eri puolilla Eurooppaa yhteensä yhdeksässä kaupungissa. Niissä käytettiin polttoaineena kaasumaista vetyä, jota valmistettiin kohteesta riippuen eri tuotantotavoilla. Näiden bussien käyttö on projektin jälkeen jatkunut muutamien siirtojen jälkeen uudessa, laajemmassa kansainvälisessä yhteistyöhankkeessa, ja samanlaisia autoja on nyt myös Australiassa (Perth) ja Kiinassa (Beijing).

Evobusin lisäksi muutamat muut yritykset ovat kehittämässä polttokennokäyttöisiä kaupunkilinja-autoja, mutta markkinoille on kaikilla vielä vuosien matka.

Polttomoottorikäyttöisiä vetybussiprototyyppisiä on valmistanut mm. MAN, jonka autoja on toiminut koekäytössä Münchenissä ja nyt myös Berliinissä.



Kuva 5.5. CUTE-projektissa kokeiltujen polttokennobussien rakennekaavio. (Schukert & Rau 2004)

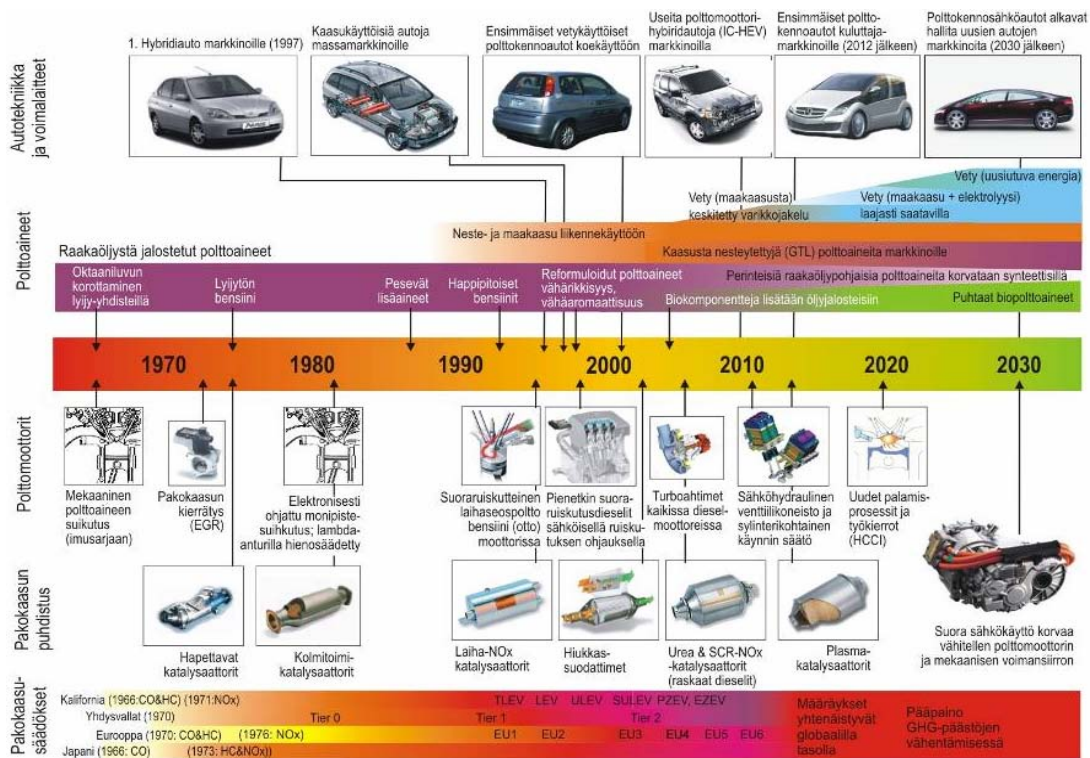
5.2.8 Energian tarpeen pienentäminen

Uutta voimalaitetekniikkaa siis kehitetään pienentämään autojen energiankulutusta. Toinen kehityslinja päästöjen vähentämisessä on vähentää auton liikuttamiseen tarvittavaa energiaa.

Auton korin ilmanvastuksen pienentämisessä on tehty melkoisia harppauksia 1980-luvun aikana. Tietokonesimuloinnilla ja tuulitunnelikokeilla on etsitty virtausvastusten kannalta edullisimpia muotoja varsin menestyksellisesti. Rajoittavana tekijänä alkaa olla matkustajatilan koko ja muoto, mikä käytännössä osittain sanelee korin korkeuden ja poikkipinta-alan. Kokonaisvastusta ei siksi voi kovin paljon enää pienentää.

Auton massa vaikuttaa sen energiankulutukseen. Hitaassa ja usein nykivätempoisessa kaupunkiliikenteessä se on myös paljon ilmanvastuksia merkittävämpi tekijä. Siksi viimeaikainen, uusien törmäystestien vauhdittama turvakorien kehittäminen on osaltaan hidastanut autojen polttoainetalouden parantamista, koska uudet autot ovat tulleet 200–300 kg edeltäjiään painavammiksi. Myös erilaisten lisä- ja mukavuusvarusteiden, kuten ohjaustehostimien ja ilmastointilaitteiden, yleistymisen myös eurooppalaisissa autoissa on jarruttanut positiivista kehitystä ja tuonut autoon paitsi lisäpainoa, myös lisää energiankulutusta.

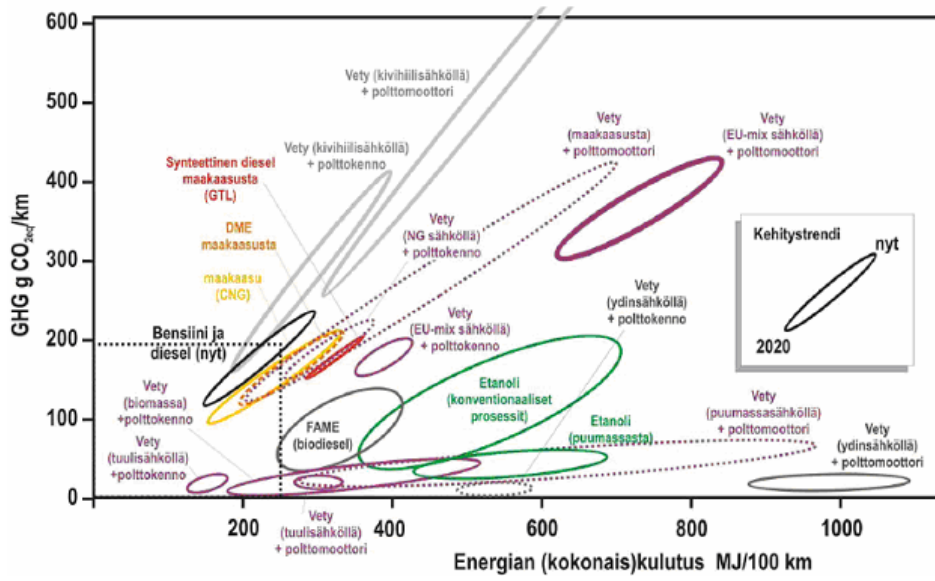
Ratkaisevimpana ja tärkeimpänä kehityskohtena nykyistä noin puolta vähäisempään energiakulutustavoitteeseen pääsemiseksi onkin nähty auton massan pienentäminen. Ensimmäisenä ja myös lyhyimmällä aikavälillä realisoituvana maalina on uuden materiaali- ja valmistustekniikan kehittäminen, joka pyritään ottamaan käyttöön välittömästi jo nykytekniikan mukaisissa autoissa. Henkilöauton massan pienentämisessä ovat komposiittimateriaalit, kuten lasi- ja hiilikuitu tehokkaampia kuin alumiini, mutta niiden valmistustekniikka ja turvallisuusominaisuudet ovat metalleja huonommat, ainakin toistaiseksi. Myös raaka-ainekustannukset ovat lujitemuoveilla ja muilla ns. komposiiteilla vielä huomattavan korkeat, mutta niiden oletetaan laskevan käytön lisääntymisen myötä. Omat vaikeutensa materiaalinhallintaan tuovat koko ajan tiukkenevat vaatimukset raaka-aineiden kierrätettävyydestä. Tavoitteena on uusilla materiaaleilla vähentää auton massaa jopa 50 %, mutta tämä realisoituu vasta 15–20 vuoden aikaviiveellä.



© J. Lamikko 2006

Kuva 5.6. Auto- ja moottoritekniikoiden, polttoaineiden ja pakokaasujen kehitysnäkymiä. (VTT 2007)

Lähde: Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels And Powertrains in The European Context - Well-To-Wheels Report, January 2004, by Eucar, Concawe & EU JRC



Kuva. 5.7. Eri polttoaineiden ja moottorien CO₂-päästöjen ja energiankulutuksen kehitysnäkymiä. (GM 2002)

Taulukko 5.2. Energiaa säästävien ja kasvihuonekaasupäästöjä vähentävien teknologioiden ja käyttötapojen kehitysarvioita ja -potentiaaleja.

Teknologia	”Kypsyys-taso”	Markkina-tilanne, markkinoille-tulo	Sähkövoiman osuus [%]	Haasteita	Kehityspotentiaali	
					2020	2050
Voimalaitetekniikka / energianlähde						
Mäntämoottori						
Ottomoottori	Valta-tekniikka	Ollut >100 v	0	Hyötysuhde/CO ₂	+	O
Dieselmoottori	Valta-tekniikka	Ollut >100 v	0	Hiukkaset + NO _x	+	O
Hybridikäyttö						
”Tavallinen”	Markkinoilla	Ollut n. 5–10 v.	0	Hinta	++	+
”Plug-in”	Konseptit valmiina	Tulossa < 5 v	20–40	Latausjärjestelmä	+	+
Akkusähköauto	Markkinoilla, hyvin pieni volyyymi	< 10 v	100	Akkuteknologia	+	+++
Polttokennoauto	Konseptit lähes valmiina	< 5–10 v	(0–100) Riippuu vedyn tuotantotavasta	Kustannukset, polttoaineinfra	+	+++
Ajoneuvo						
Kevyet materiaalit	Varsin laaja saatavuus	Rajoitetusti käytössä	Alumiinin valmistus!	Kustannukset, sovittaminen rakenteeseen ja valmistukseen	+	+++
Aerodynaamiikka	Perusasiat hallitaan	Henkilöautoissa jo pitkälti käytössä, ras-kaassa kalus-tossa < 5–10 v.	n/a	Henkilöautoissa matkustamon muoto		
Käyttö						
Säästävä ajotapa	Koulutus-paketteja	Osa uusien kuljettajien koulutusta, muille vapaa-ehtoinen	n/a	Asenteet	+	O
”Drive-by-wire”	Kehitteillä	< 5–10 v	n/a	Toiminnallisuus vs. kustannukset		
Ruuhkaenna-koiva reaaliai-kainen reititys (navigointi)	Kehitteillä, joitain konsepteja olemassa	> 10 v	n/a	Infrastruktuurin kehitystarve, laitealustojen suuri määrä	+	++

5.2.9 Muut kulkuneuvot ja työkoneet

Muut kulkuneuvot kuin auto ovat ehkä vielä hitaammin uudistettavissa, sillä laivoissa ja lentokoneissa käyttöiät ovat vielä paljon pitemmät kuin autokalustossa. Lentokoneissa voimalaitteelle asetetut, samanaikaiset vaatimukset erittäin hyvästä luotettavuudesta, keveydestä, vähäpäästöisyydestä ja pienestä energiankulutuksesta on hyvin vaikea täyttää muulla kuin nykytekniikalla. Lentokoneiden polttoainetalous on parantunut vuosien mittaan kuitenkin huomattavasti.

Lentoliikenne

Lentoliikenne on sekä maailmanlaajuisesti että Suomessa nopeimmin kasvava liikennemuoto. Pitkälti polttoainekustannusten ajamana polttoaineen ominaiskulutus on parantunut merkittävästi ja on nyt noin 70 % pienempi kuin 40 vuotta sitten kun suihkumoottorista tuli valtatekniikka.

Pitkät lentomatkat ovat suhteellisesti edullisempia, koska nousu kuluttaa eniten polttoainetta. Eräät arviot pitävät alle 4 000 km:n matkoja epätaloudellisina. Nykyaikainen suihkumatkustajakone kuluttaa noin 3 litraa/100 km matkustajaa kohden pitkämatkaisuudessa liikenteessä, joten sen ominaiskulutus on henkilöauton luokkaa.

Suihkumoottorin toimintaperiaate on likimain sama kuin voimatuotannossakin käytettävän kaasuturbiinin, mutta suihkumoottorissa työntövoima kehitetään ainoastaan ilmavirtauksen kiihdyttämisellä eikä lainkaan mekaanista reittiä kuten kaasuturbiineissa. Siksi sen rakenne on hieman erilainen. Avaintekijä polttoainetaloudelle on ns. virtaussuhde eli se määrä ilmaa, joka kyetään kiihdyttämään liikkeelle suhteessa moottorin käyttämään palamisilmaan. Mitä enemmän ilmaa virtaa ohi turbiinin, sitä vähemmän joudutaan käyttämään polttoainetta.

Lyhyillä matkoilla suositaan potkuriturbiinikoneita, joissa moottorit ovat useimmiten juuri sovellettuja kaasuturbiineja, joissa polttoaineen kulutus on siten pienempi kuin suihkumoottoreissa, mutta potkurikoneiden nopeudet ovat alempia kuin suihkukoneiden.

Lentoliikenteen nykyiset pääpolttoaineet ovat molemmat raakaöljyjalosteita. Kerosiinia eli lentopetrolia käytetään suihkumoottoreissa ja potkuriturbiineissa. Se on dieselpolttoaineen tapainen ns. keskitisle. Pienkoneissa, joissa on mäntämoottorit, käytetään lentobensiiniä, joka on korkeaoktaanista moottoribensiiniä. Aivan viime aikoina on kokeiltu myös dieselmoottoria pienkoneissa, jolloin nekin voisivat siirtyä käyttämään kerosiinia, mikä olisi logistisesti ja kustannuksiltaan edullisempi vaihtoehto.

Eräitä kehityshankkeita on julkistettu biopolttoaineiden käyttämisestä lentoliikenteessä, mutta käyttöolosuhteet varsinkin suihkumoottorikalustossa ovat hyvin vaativat, sillä polttoaineen on toimittava moitteetta jopa alle $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa, mikä sulkee mm. perinteiset kasviöljyjalosteet kokonaan pois, koska niiden viskositeetti on noissa olosuhteissa aivan liian suuri. Myös vaatimus suuresta energiasisällöstä painoa kohden kaventavat valinnan mahdollisuuksia. Periaatteessa ainakin maakaasusta tai synteetisikaasusta valmistettu nestemäinen tuote voisi kuitenkin olla mahdollinen

Muita teknologioita, joilla on merkitystä polttoainetaloudelle, ovat koneiden painon keventäminen, jossa avainasemassa ovat komposiittimateriaalit, ja uudet alumiini-seokset.

Raideliikenne

Kiskoliikenne on ainoa merkittävä liikennemuoto, jossa käyttövoima jo nyt on jokin muu kuin raakaöljystä jalostettu tuote. Suomessa pääradat on sähköistetty, ja likimain 80 % liikenteestä ajetaan sähkökäyttöisellä kalustolla. Rataverkon uudistuksilla pyritään lyhentämään matkoja ja ratoja parantamalla nostamaan nopeuksia, jolloin matka-ajat lyhenevät ja junalla matkustaminen tulee kilpailukykyisemmiksi lentämisen kanssa. Tämän on kuitenkin havaittu aiheuttavan ainakin Suomessa lyhyellä aikavälillä vääristymiä, kun kysynnän siirtyessä rautateille monet lyhyen matkan kotimaan lentovuorot ovat lopettamisuhan alaisia, ja niitä pyritään ”tekohengittämään ” erilaisin aluepoliittisin toimin ja varoin. Näin toimitaan siksi, että lentoyhteys nähdään usein elinkeinoelämän toiminta- ja kehitysedellytysten kannalta strategiseksi tekijäksi, ja sen puuttuminen saattaa vaikeuttaa seudullista kehitystä.

Vaikka henkilöliikenteeseen on periaatteessa useita vaihtoehtoja, ne eivät yleensä suinkaan ole kaikkien yksittäisten matkojen toteuttamisessa aidosti valinnaisia, vaan matkan pituuden ja määränpäiden mukaan on kulloinkin vain muutamia vaihtoehtoja tarjolla. Raideliikenne on järkevää vain siellä, missä kapasiteetille saadaan riittävä käyttöaste.

Meri- (ja muu vesi)liikenne

Meriliikenteessä kaluston käyttöikä on todella pitkä ja uusiutuminen hidasta. Merikuljetusten (suhteellinen) halpuus heikentää investointi-intensiteettiä.

Laivojen päävoimalaitteina on tänä päivänä yleisin polttomoottori, joka on joko suuri, hidaskäyntinen kaksitahtimoottori, tai ns. keskinopea nelitahtimoottori. Jälkimmäisen tekniikka on hyvin samantapaista kuin sähkövoimaloiden generaattorien pyörittämiseen käytettävä, ja monissa nykyaikaisissa laivoissa moottorit ovatkin vain sähköntuottajia, kun koko ajokoneisto perustuu sähkövoimaan.

Nämä suuret moottorit ovat kokonaishyötysuhteeltaan yleensä kaikista mäntämoottoreista parhaita, ja polttoaineen ominaiskulutus (g/kWh) on niissä erittäin pieni. Tulevaisuuden haasteena niissä onkin enemmän haitallisten ympäristöpäästöjen vähentäminen kuin hyötysuhteen nostaminen, kun polttoaineina enenevässä määrin käytetään aikaisempaa raskaampia ja huonolaatuisempia öljylaatuja.

Eräissä, etenkin nopeissa erikoislaivoissa käytetään myös kaasuturbiineja tai jopa höyryturbiineja, erityisesti ydinreaktorin voimin kulkevilla laivoissa. Niitä on tehty jo 1960-luvulta alkaen, tosin lähes poikkeuksetta vain sotilaskäyttöön.

Laivakäytössä polttokenno on periaatteessa yhtä mahdollinen kuin autoissa, ja itse asiassa koekäyttöä on jo tehty. Tietä uudelle tekniikalle tasoittaa nykyaikaisten risteilylaivojen teknologia, joka jo nyt perustuu sähkökäyttöön, ja polttomoottorit toimivat niissä vain sähkövoimaloina, jotka periaatteessa olisi verrattain helppo korvata polttokennoilla. Vuosien varrella on nähty myös joitain uusia innovatiivisia kehitelmiä purjelaivoista, ja joitain kokeiluja ainakin apupurjeista moottorikäyttöisissä valtamerialuksissa on tehtykin.

Energian kulutuksen pienentäminen laivan rungon kulkuvastuksia pienentämällä on eräs myös mahdollinen kehityslinja, jota kuljetaankin. Usein kulkuvastusten pienentäminen kuitenkin tähtää kulkunopeuden kasvattamiseen, jolloin positiiviset vaikutukset hukataan.

Mitään nopeaa muutosta tuskin kuitenkaan nähtäen, sillä laivojen käyttöiät ovat kymmeniä vuosia, ja tällä hetkellä ne käyttävät moottoriensa polttoaineena yleensä halvimpia mahdollisia raakaöljytuotteita (raskas polttoöljy ja ns. pohjaöljyt). Kynnys kalliimman tekniikan ja polttoaineen omaksumisessa on siten varsin korkea. Meriliikenne tapahtuu myös suurelta osin kansainvälisillä vesialueilla, ja niille on vaikeaa kohdistaa mitään kansallisen tai edes kansainvälisen tason säätelyä. Ainoastaan satamakäyntien rajoittamisen kautta voidaan jotain kehitystoimia yrittää vauhdittaa. Merkittävä rooli on alan kansainvälisellä järjestöllä, International Maritime Organisationilla (IMO).

Työkoneet

Työkoneissa käytetään varsin pitkälle samantapaista moottoritekniikkaa kuin kulkuneuvoissa, ja niinpä niihin pätee pitkälle sama lainalaisuus kuin yleensä kulkuneuvojen moottoritekniikassakin: uudet moottorisukupolvet ovat energiatehokkaampia kuin vanhat. Säänneltyjen päästöjen rajoittaminen myös työkoneissa vähentää kuitenkin mahdollisuutta parantaa energiatehokkuutta.

Työkonekenttä jakaantuu myös eräällä tavalla kahteen erilliseen, toisistaan melko lailla poikkeavaan osaan, joista toinen on raskas, yleensä ammattimaisessa toiminnassa käytettävä kalusto, ja toisessa ovat pienet, usein vain yksityisessä käytössä olevat työko-

neet. Edellisessä ryhmässä koneiden vuosittaiset käyttöajat ovat yleensä suuria ja kaluston uusiutuminen kohtuullista, koska polttoaineen kulutus on suuri kustannuserä, ja uudet koneet ovat yleensä vähäkulutuksisempia kuin vanhat.

Pienkonesektorilla taas koneita ja työvälineitä käytetään tyypillisesti niin vähän, että niiden energiankulutus ei ole merkittävä kuluerä, eikä uusimiseen synny siten aitoa tarvetta, vaan vanhankin koneen käyttöä jatketaan hyvinkin pitkään. Pienkoneissa ja etenkin ei-ammattimaisessa yksityiskäytössä myös kustannuspaineet ovat kovat, mikä rajaa mahdollisuuksia panostaa koneiden energiankulutuksen pienentämiseen.

5.3 Biopolttoaineet

Liikenteen biopolttoaineiden käyttöä pyritään edistämään liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja polttoaineomavaraisuuden parantamiseksi. Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen pyritään monin keinoin, joiden yhteisenä tavoitteena on liikenteen kasvun hillintä, liikennemuotojen työnjakoon vaikuttaminen sekä kulkuneuvojen ominaispäästöjen ja -kulutuksen vähentäminen.

Biopolttoaineiden käyttö liikenteessä on ollut Suomessa viime vuosina 0,1 prosenttia (energiana) tieliikenteen polttoaineista. Vuoteen 2007 asti on käytetty pääasiassa tuontietanolia bensiinissä enintään viiden tilavuusprosentin osuutena. Lisäksi Suomessa on ollut pienessä mittakaavassa biodieselin tuotantoa rypsiöljystä ja biokaasun tuotantoa lähinnä maatalouden jätteistä ja näiden biopolttoaineiden käyttöä liikenteen polttoaineena muutamissa autoissa. Vuonna 2007 Suomessa käynnistyi laajamittainen biopolttoaineiden tuotanto, kun Neste Oil käynnisti ensimmäisen biodieseltuotantolaitoksen (NExBTL) yhtiön Porvoon jalostamolla.

Vuoden 2008 alusta Suomessa astui voimaan biopolttoaineiden käyttövelvoitelaki, joka asettaa polttoaineiden jakelijoille velvoitteen toimittaa vuosittain kulutukseen vähimmäisosuuden biopolttoaineita. Vähimmäisosuus kasvaa vuosittain siten, että se on vuonna 2008 vähintään kaksi prosenttia liikennepolttoaineiden jakelijan kulutukseen toimittamien moottoribensiinin, dieselöljyn ja biopolttoaineiden energiasisällön kokonaismäärästä. Vuonna 2009 osuus on vähintään neljä prosenttia ja vuonna 2010 ja sen jälkeen vuosittain vähintään 5,75 prosenttia vastaten EU:n ns. biopolttoainedirektiivin tavoitetta vuodelle 2010. Biopolttoaineita voidaan toimittaa kulutukseen joko sellaiseenaan tai bensiiniin ja dieseliin sekoitettuna.

Tehdyt investointipäätökset mahdollistavat lähes kymmenen prosentin biopolttoaineosuuden Suomessa vuonna 2010, jos tuotetut biopolttoaineet jäävät Suomen mark-

kinoille. Kansainväliset biopolttoainemarkkinat ovat kasvussa, ja biopolttoaineet tulevat ohjautumaan eri maiden välillä maksukyvyyn perusteella.

Tarkasteltaessa liikenteen biopolttoaineiden avulla saavutettavissa olevia kasvihuonekaasujen päästön vähenemisiä nykyisin käytössä oleviin polttoaineisiin verrattuna tulee ottaa huomioon sekä biopolttoaineiden tuotannon että käytön kasvihuonekaasupäästöt. Arviot saavutettavista kasvihuonekaasupäästöjen vähenemisistä vaihtelevat tarkastelujen rajauksen, valitun vertailukohdan, raaka-aineen ja prosessin sekä muiden laskennassa käytettyjen oletusten ja parametrien mukaan sisältäen myös aiheutuvien maankäytön muutosten vaikutuksen päästöihin.

Moniin laskelmien parametreihin sisältyy huomattava epävarmuus. Järjestelmävaikutusten vuoksi (kuten kilpailu maa-alasta tai raaka-aineesta) ei voida useinkaan tehdä luotettavia arvioita kasvihuonevaikutuksista. Eurooppalaisesta viljasta valmistetulla etanolilla ja kasviöljyistä valmistetulla biodieselillä voidaan vähentää 40–60 % koko ketjun kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna fossiiliseen bensiiniin ja dieseliin ulkomaisten tutkimusten mukaan. Jossain tilanteissa, mm. suomalaisista raaka-aineista nykYTEKNIKOILLA valmistetuissa biopolttoaineissa, kasvihuonekaasujen päästöt eivät välttämättä ole pienempiä kuin fossiilisella bensiinillä ja dieselillä. (Mäkinen et al. 2006)

Kehitteillä olevilla uusilla biopolttoaineilla, joita valmistettaisiin esim. metsätähteistä, oljesta, ruokohelvestä tai jäteraaka-aineista, on mahdollista saavuttaa 30–80 prosentin päästön vähenemisiä verrattuna fossiiliseen dieseliin tai bensiiniin. Metsäojitetuilta soilta tuotetusta turpeesta tehdyllä dieselillä kasvihuonekaasujen päästöt ovat keskimääräisessä tapauksessa samaa luokkaa tai huomattavasti suuremmat kuin fossiilisella dieselillä, kun tarkastellaan IPCC:n käyttämää sadan vuoden aikajaksoa. (Kirkinen et al. 2007)

Nykyiset biopolttoaineiden tuotantovaihtoehdot eivät ole pääsääntöisesti taloudellisesti kilpailukykyisiä fossiilisiin vaihtoehtoihin verrattuna ilman viranomaisten tukitoimenpiteitä. Nykyiset biopolttoaineet tuovat keskimäärin 20–40 senttiä lisähintaa ekvivalenttista öljylitraa kohden polttoaineiden bio-osuudelle verrattuna bensiiniin ja dieseliin.

Uusilla kehitteillä olevilla tekniikoilla on mahdollista tuottaa biopolttoaineita alhaisemmillä tuotantokustannuksilla. Esimerkiksi metsäteollisuuden laitokseen integroiduissa laitoksissa biopohjaisten dieselpolttoaineiden tuotantokustannukset olisivat nykyisillä raaka-ainehinnoilla noin 50 senttiä ekvivalenttista öljylitraa kohden, joka on samaa tasoa kuin dieselpolttoaineen nykyinen veroton hinta ilman jakelukustannuksia. (McKeough & Kurkela 2007)

5.3.1 Etanoli

Etanolia valmistetaan pääasiassa fermentoimalla sokereita mikro-organismien avulla alkoholiksi. Sokeri- ja tärkkelyspitoisiin viljelykasveihin perustuva prosessi on tunnettua tekniikkaa ja käytössä polttoainetuotannossa laajassa mittakaavassa Brasiliassa ja Yhdysvalloissa. Suomessa on ollut viime vuonna käynnissä useita selvityksiä ja hankkeita, joissa on kaavailtu vastaavien polttoaine-etanolin tuotantolaitoksien rakentamista Suomeen. Suomessa raaka-aineeksi soveltuisi parhaiten ohra. Prosessissa saadaan sivutuotetta, joka hyödynnettäisiin rehuna. Käytännössä Suomen rehumarkkinat rajaavat viljaetanolin tuotannon Suomessa yhteen laitokseen, jonka tuotanto olisi enimmillään 60 000 tonnia etanolia vuodessa.

St1 Biofuels on kaupallistanut alun perin VTT:llä kehitettyä konseptia, joka perustuu etanolin hajautettuun tuotantoon sokeri- tai tärkkelyspohjaisista jäteraaka-aineista pienissä tuotantoyksiköissä. Ensimmäinen kaupallinen laitos käynnistyi vuonna 2007. Sokeri- ja tärkkelyspitoisten jäteraaka-aineiden määrä rajoittaa tuotannon Suomessa noin 10 000 tonniin etanolia vuodessa. St1 Biofuels kehittää prosessia tavoitteena pystyä hyödyntämään myös selluloosapitoisia jätevirtoja.

Maailmanlaajuisesti katsottuna merkittävin osa alan tutkimus- ja kehityspanostuksista on suuntautunut hankkeisiin, joissa tutkitaan ja kehitetään teknologioita etanolin tuottamiseksi lignoselluloosaraaka-aineista. Lignoselluloosaraaka-aineista, kuten puusta ja oljesta, on mahdollista valmistaa etanolia vapauttamalla ensin selluloosan ja hemiselluloosan sokerit entsyymaattisesti tai kemiallisesti hydrolyysin avulla. Etanolin lisäksi prosessissa saadaan sivutuotteena ligniinipolttoainetta. Kanadalaisella Iogenilla on toiminnassa demonstraatiolaitos, jossa käytetään olkea raaka-aineena. Kaupallinen tuotanto voisi käynnistyä aikaisintaan noin vuonna 2012.

VTT:n ja MTT:n yhteishankkeessa arvioitiin alustavasti, että Suomessa olisi ohran olkea ja/tai ruokohelpeä hyödyntävään etanolintuotantolaitokseen saatavilla raaka-ainetta noin 160 000 tonnia, jolloin etanolin tuotanto olisi noin 31 000 tonnia vuodessa. Nykytekniikalla etanolin tuotantokustannukset osoittautuivat vielä noin kaksinkertaisiksi verrattuna viljan jyviä raaka-aineena käyttävään etanolitehtaaseen. (von Weymarn 2007)

Erityisesti Ruotsissa kehitetään etanolin valmistusta puusta. Örnköldsvikissä, Ruotsissa on keuhällä 2004 käynnistynyt koetehdas, jossa tuotetaan 400–500 litraa etanolia vuorokaudessa puuraaka-aineista. Puun rakenteen vuoksi hydrolyysi on kuitenkin hankalampaa kuin tärkkelyspitoisen raaka-aineen tai viljan oljen. Puupohjaisessa tuotannossa ligniinipolttoaineen massasaanto on lähes kaksinkertainen etanolin saantoon verrattuna. Suomessa suurin puuraaka-ainepotentiaali on metsähakkeella. Metsähakkeen hyödyntäminen raaka-aineena saattaa kuitenkin olla ongelmallista muun muassa korkean kuoripitoisuuden vuoksi.

Laboratorioasteella on kehitteillä synteetisikaasun fermentointiin perustuvia prosesseja mm. Yhdysvalloissa ja Suomessa.

5.3.2 Biodiesel (FAME)

Kasviöljyt eivät sovi sellaisenaan nykyisten ajoneuvojen polttoaineeksi. Kasviöljyt vaihtoesteröidään alkoholin kanssa viskositeetin ja kylmäominaisuuksien säätämiseksi dieselkäyttöön soveltuvaksi. Yleensä vaihtoesteröintiin käytetään metanolia, jolloin kasviöljyjen rasvahapot ja metanoli reagoivat muodostaen rasvahappojen metyyliesteireitä (FAME), ns. biodieseliä, sekä glyserolia.

Suomessa raaka-aineena tulisi lähinnä kyseeseen rypsi (biodieseltuotteena RME, rypsimetyyliesteri). Maatilakokoluokan RME-tuotanto on käynnistynyt, ja laitteita on myyty 20–30 maatilalle Suomessa. Tuotanto on ollut arviolta 1 000 tonnia vuodessa. Tällä hetkellä ei ole tietävästi käynnissä hankkeita, joissa suunniteltaisiin Suomeen RME:n tehdasmittakaavaista tuotantoa (laitoksen tuotanto useita kymmeniä tuhansia tonneja vuodessa). Suomessa rypsisato ei ole riittänyt kotimaisen elintarviketeollisuuden tarpeisiin.

Uusimmissa tuotantolaitoksissa Euroopassa hyödynnetään raaka-aineena myös ravintoloiden ja elintarviketeollisuuden käytettyjä kasviöljyjä, lisäksi tarkastellaan mahdollisuuksia eläinrasvojen hyödyntämiseen raaka-aineena. Näiden raaka-aineiden saatavuus on kuitenkin hyvin rajallinen polttoainemarkkinaan nähden.

Perinteisen biodieselin määrä kasvaa lähivuosina eurooppalaisilla biopolttoainemarkkinoilla, mutta uusien synteettisten biopohjaisten dieseltuotteiden tullessa markkinoille laajamittaisesti perinteisen biodieselin uskotaan yleisesti vähenevän vähitellen markkinoilla.

5.3.3 Biokaasut

Orgaanisesta materiaalista, esim. jätevesilietteistä tai biojätteistä, voidaan anaerobikäsitelyssä tuottaa niin sanottua biokaasua, joka koostuu lähinnä metaanista ja hiilidioksidista. Kaatopaikoilla muodostuu vastaavaa kaasua, niin sanottua kaatopaikkakaasua. Biokaasuja voidaan hyödyntää liikenteen polttoaineena puhdistuksen ja paineistuksen jälkeen. Suomessa on toiminnassa yksi maatilakokoluokan biokaasulaitos, jossa puhdistetaan biokaasua liikennekäyttöön. Yhdellä kaatopaikalla on käynnissä kokeilu kaatopaikkakaasun puhdistamiseksi liikennekäyttöön sopivaksi polttoaineeksi. Puhdistuksen ja paineistuksen kustannukset käytännössä rajaavat anaerobiprozessissa muodostuvan biokaasun liikennekäyttöä.

Tulevaisuudessa kehitystyön onnistuessa myös termisesti kaasuttamalla voitaisiin valmistaa kaasumaista polttoainetta kaasujoneuvojen polttoaineeksi. Termisellä kaasutuksella tuotetaan vetyä ja hiilimonoksidia sisältävää kaasua, joka voidaan edelleen prosessoida metaaniksi. Termisen biokaasun potentiaali on anaerobisesti valmistetun biokaasun potentiaalia huomattavasti merkittävämpi.

Meneillään on useita hankkeita, joissa pyritään eri raaka-aineista valmistetun biokaasun liikennekäytön lisäämiseen, selvitetään esimerkiksi mahdollisuuksia käyttää maakaasuverkkoa biokaasun siirrossa jakeluasemille tai muihin käyttökohteisiin.

5.3.4 Biodiesel (vetykäsittely)

Neste Oil on kehittänyt uudentyypin biodieselprosessin, jossa tuotetaan kasviöljyistä ja eläinrasvoista hiilivedyistä koostuvaa biodieselpolttoainetta perinteisen rasvahappoesteristä muodostuvan biodieselin sijasta. Neste Oilin prosessi perustuu raaka-aineen vetykäsittelyyn. Ensimmäinen laitos, tuotantokapasiteetiltaan 170 000 t/a, käynnistyi vuonna 2007, ja toinen samankokoinen laitos käynnistyy vuonna 2009.

Laitosten pääraaka-aineena on tällä hetkellä palmuöljy ja muina raaka-aineina rypsiöljy, käytetyt kasviöljyt ja eläinrasvat. Kasviöljyjen, joita käytetään myös elintarviketuotannossa, saatavuus on rajallinen. Maailmalla onkin käynnissä paljon kehitystyötä, jossa etsitään ja kehitetään öljykasveja, jotka kasvavat vaatimattomissa kasvuoloissa eivätkä kilpaile ruoantuotannon kanssa, esimerkiksi jathropa. Lisäksi kehitetään vedessä kasvavia öljyjä tuottavia biomassoja, kuten leviä.

5.3.5 Synteettiset polttoaineet (kaasutus)

Biomassasta on mahdollista valmistaa liikenteen biopolttoaineita myös ns. synteetisikaa sureitin kautta. Tässä prosessissa biomassasta valmistettaisiin ensin termisesti kaasuttamalla synteetisikaasua. Synteetisikaasusta voidaan tunnetuilla prosesseilla valmistaa korkealaatuista dieselpolttoainetta, niin sanottua Fischer–Tropsch-dieseliä, metanolia tai dimetyylieetteriä (DME). Metanolista voitaisiin edelleen valmistaa eettereitä, kuten MTBE:tä, käytettäväksi bensiinin lisäaineina. Synteetisikaasusta voidaan valmistaa myös synteettistä maakaasua tai vetyä. Kaasutuksen tuotekaasu täytyy ennen synteesiä puhdistaa epäpuhtauksista eri kaasunpuhdistusmenetelmillä ja edelleen konvertoida synteetisiprosessin vaatimusten mukaiseksi synteetisikaasuksi.

Synteetisikaasua voidaan valmistaa maakaasusta, kivihielestä ja erilaisista biomassoista. Liikenteen biopolttoaineiden valmistukseen Suomessa tulisivat kyseeseen lähinnä puu-

raaka-aineet, kuten metsätähde, sekä ruokohelpi ja jättepohjaiset raaka-aineet. Raaka-aineena voisi olla myös turve. Ruotsissa on tutkittu myös sellunkeiton jäteliemen, niin sanotun mustalipeän, käyttömahdollisuuksia.

Synteetikaasupohjaiset prosessit ovat periaatteessa tunnettua tekniikkaa. Biomassan käyttöönotto synteetikaasupohjaisten prosessien raaka-aineena vaatii kuitenkin vielä kehitystyötä. Tutkimus- ja kehitystyöllä haetaan korkeahyötysuhteisia ja kustannustehokkaita prosessiratkaisuja. Suomessa teknologiaa kehitetään useammassa teollisuuskonsortiossa tavoitteena uuden teknologian demonstrointi vuosina 2009–2010 ja kaupallistuminen vuosien 2012–2014 aikana.

Suomessa kaavailtujen konseptien perusajatuksena on ollut biopolttonesteiden ja sähkön tai lämmön yhteistuotanto, mikä näyttäisi tarjoavan useita vaihtoehtoja kehittää kokonaisyötyosuhteeltaan ja taloudeltaan houkuttelevia yhteistuotantolaitoksia esim. metsäteollisuusintegraatin tai öljynjalostamon yhteydessä. Integroinnin etuina saavutetaan erittäin korkea biomassan käyttöaste, energiahyötysuhde voi olla jopa noin 90 prosenttia, mikä on tärkeä kilpailuetu tulevaisuuden markkinoilla, joilla uusiutuvista energia- ja raaka-ainevaroista vallitsee nykyistä kovempi kilpailu.

Paperi- ja sellutehdasympäristöön sijoitettavan laitoksen tyypillinen koko on 50 000–150 000 tonnia dieselpolttoainetta vuodessa, mikä vastaa 150–400 MW:n biomassasyöttoa. Tällaisissa laitoksissa biopohjaisten dieselpolttoaineiden tuotantokustannukset nykyisillä raaka-ainehinnoilla ovat alle 50 senttiä ekvivalenttista öljylitraa kohden. (McKeough & Kurkela 2007)

5.3.6 Pyrolyysitekniikalla tuotetut bioöljyt

Biomassasta voidaan valmistaa bioöljyjä ns. pyrolyysitekniikalla. VTT:n koordinoimassa EU-hankkeessa kehitetään prosessia, jossa ns. nopealla pyrolyysillä tuotetusta bioöljystä jalostetaan perinteisen öljynjalostamon raaka-ainekäyttöön soveltuvaa bioöljyä (ns. bio-crude). Hankkeen tavoitteena on, että prosessin demonstrointi olisi mahdollista vuonna 2011.

Pyrolyysitekniikkaa voidaan hyödyntää myös biomassaraaka-aineen esikäsittelyyn kaasutukseen perustuvissa biopolttaineiden tuotantoprosesseissa. Logistisista syistä voi olla edullisempaa tuottaa hajautetusti pienemmissä yksiköissä pyrolyysitekniikalla bioöljyä ja kuljettaa biomassan nesteenä biopolttaineiden tuotantolaitoksiin, joissa bioöljy kaasutetaan ja tuotetusta synteetikaasusta valmistetaan synteettisiä polttaineita.

Lähdeviitteet ja lisätietoja

GM 2002. Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study. L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, Germany. 27th September 2002.

Honda 2007. Honda Introduces Experimental Home Energy Station IV – Appliance-like device may help solve problem of hydrogen supply for fuel cell vehicles. News release, November 14, 2007. <http://world.honda.com/news/2007/4071114Experimental-Home-Energy-Station/>.

Kirkinen, J., Soimakallio, S., Mäkinen, T., McKeough & P. Savolainen, I. 2007. Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset. Espoo, VTT. 45 s. VTT Tiedotteita – Research Notes 2418. ISBN 978-951-38-6976-2; 978-951-38-6978-6. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2418.pdf>.

McKeough, P. & Kurkela, E. 2007. Detailed comparison of efficiencies and costs of producing FT liquids, methanol, SNG and hydrogen from biomass, 15th European Biomass Conference, Berlin, Germany, May 7–11, 2007.

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. Espoo, VTT. 134 s. + liitt. 19 s. VTT Tiedotteita – Research Notes 2357. ISBN 951-38-6825-7; 951-38-6826-5. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2357.pdf>.

RASTU 2007. RASTU-vuosiraportti 2006, toim. Nylund, N.-O., VTT-R-04802-07. 103 s.

Schuckert, M. & Rau, W. 2004. The DaimlerChrysler Fuel Cell Bus Activities – A Major step towards cleaner urban transport, 2nd International Fuel Cell Bus Workshop, Porto, Portugal, 18.11.2004. http://www.premia-eu.org/public_files/04_Manfred%20Schuckert_DaimlerChrysler.pdf.

Sipilä, K. & Mäkinen, T. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa, työryhmän mietintö. KTM Julkaisuja 11/2006. Helsinki, Kauppa- ja teollisuusministeriö. 132 s. ISBN 951-739-983-9. [http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/92AA9268109E88ECC2257180002A497E/\\$file/jul11eos_2006_netti.pdf](http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/92AA9268109E88ECC2257180002A497E/$file/jul11eos_2006_netti.pdf).

von Weymarn, N. (toim.). 2007. Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista. Espoo, VTT. VTT Tiedotteita – Research Notes 2412. 44 s. ISBN 978-951-38-6968-7. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2412.pdf>.

VTT 2007. Energy Use, Visions and Technology Opportunities in Finland. Edita Prima. 234 s. ISBN 978-951-37-4742-8.

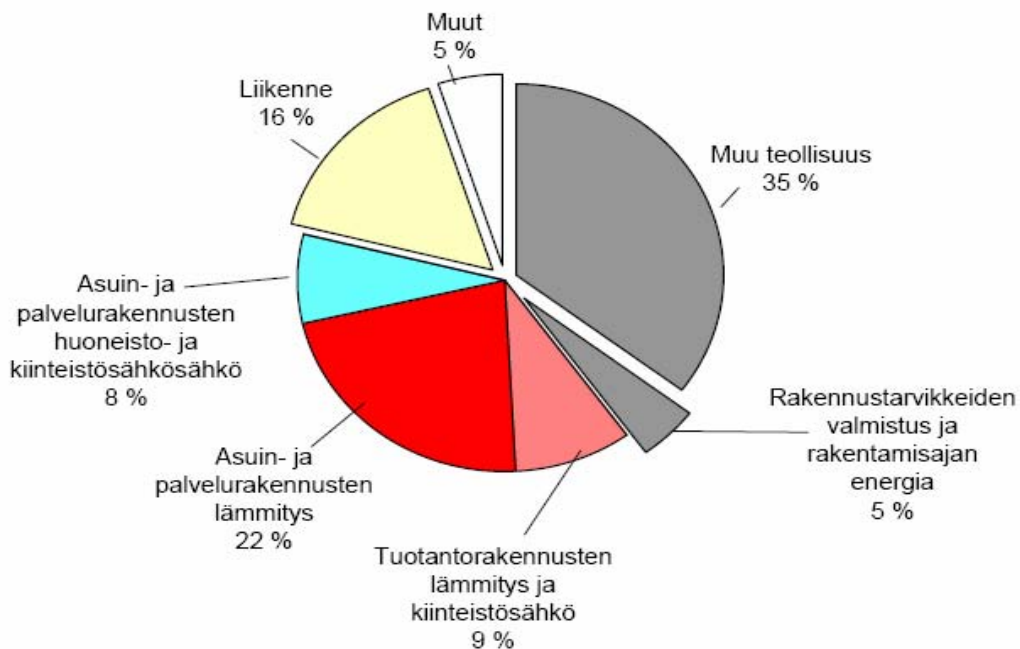
VTT LIPASTO 2006. Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä, VTT. <http://lipasto.vtt.fi/>.

6. Rakennussektori

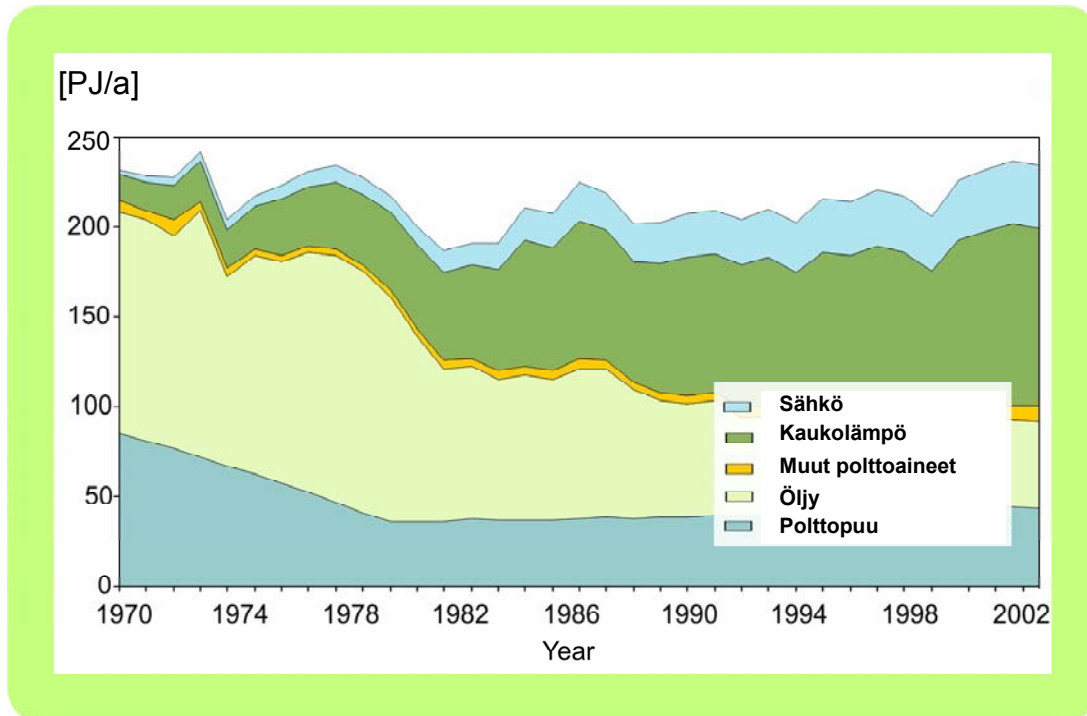
6.1 Rakennusten energiankäyttö

Suomessa asuin-, palvelu- ja tuotantorakennukset käyttivät lämmitysenergiana ja kiinteistösähköä 39 % koko Suomen energian loppukäytöstä vuonna 2003. Tämän lisäksi rakennustarvikkeiden valmistus- ja rakentamisajan energia olivat yhteensä 5 % energian loppukäytöstä. Kiinteistö- ja rakennuskannan energiankulutuksen trendit vaikuttavat siis hyvin keskeisesti koko Suomen energiankulutukseen ja tätä kautta kasvihuonekaasujen päästöihin sekä kansallisiin päästöjen vähennystavoitteisiin.

Energian loppukäyttö Suomessa 2003, Yhteensä 308 TWh

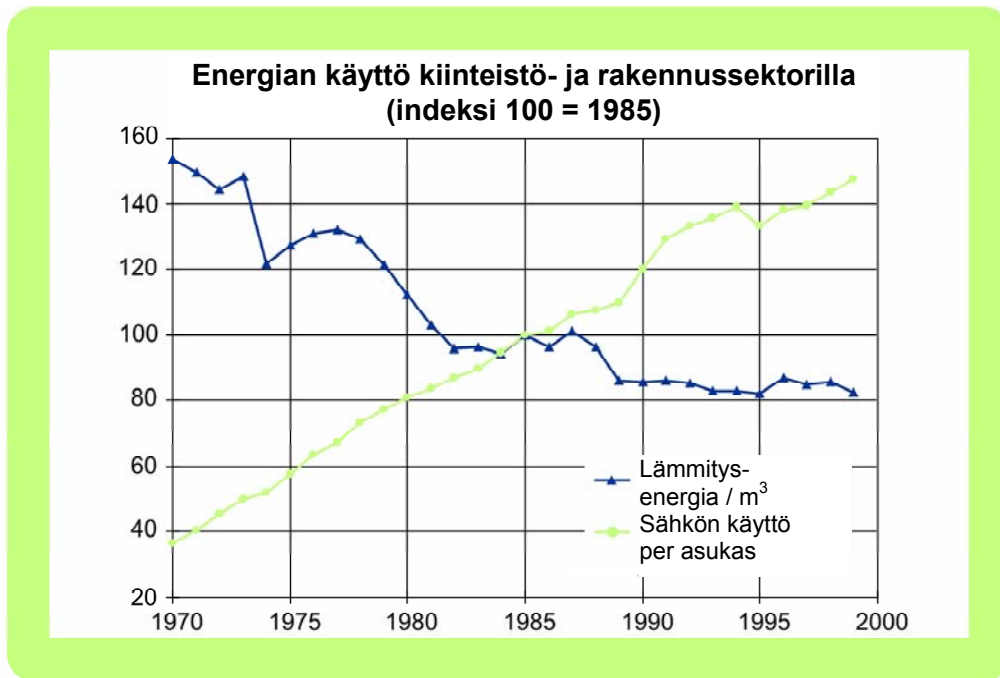


Kuva 6.1. Energian loppukäyttö Suomessa 2003 – asuin-, palvelu- ja tuotantorakennusten lämmitys ja kiinteistösähkö. (Heljo et al. 2005)



Kuva 6.2. Suomalaisten rakennusten käyttämän lämmitysenergian lähteet 1970–2002. (VTT 2007)

Suomen asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen eri energialähteiden määrät ja keskinäiset suhteet ovat muuttuneet kolmen viime vuosikymmenen aikana. Polttopuulla tuotetun lämmitysenergian määrä oli vuonna 1970 85,3 PJ/a, josta se on vähentynyt ja vakiintunut nykyiselle tasolle (noin 44 PJ/a). Myös öljyllä tuotetun energian määrä on vähentynyt samalla tarkastelujaksolla 1970–2003 selvästi (123,2 PJ/a -> 49,8 PJ/a). Samaa aikaa lämmityksen energialähteinä ovat osuttaan kasvattaneet sähkölämmitys (0,6 PJ/a -> 9,7 PJ/a) ja erityisesti kaukolämpö (4,0 PJ/a->28,1 PJ/a). Muiden energialähteiden määrä edellisiin verrattuna on pysynyt melko pienenä (7,7 PJ/a), vaikkakin lämpöpumppujen energiamäärä on ollut kasvussa (4,6 PJ/a vuonna 2003), ja tämän kasvun ennustetaan jatkuvan myös tulevaisuudessa.



Kuva 6.3. Lämmitysenergian ja sähkön käytön trendit kiinteistö- ja rakennusalalla vuosina 1970–2000. (VTT 2007)

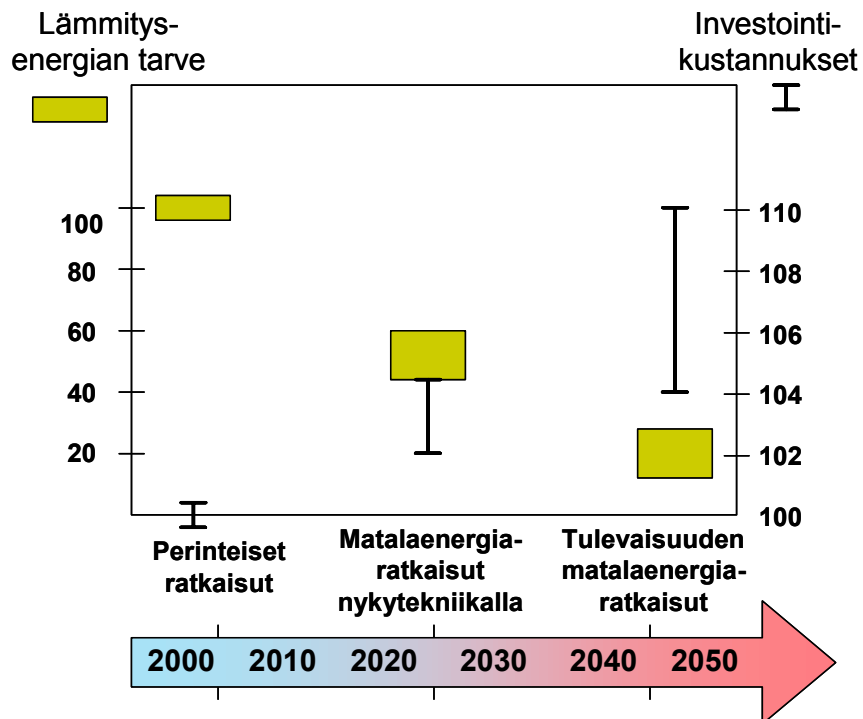
Rakennusten lämmitysenergian käytön tehokkuus on parantunut Suomessa selvästi. Kolmen viime vuosikymmenen aikana Suomen koko rakennuskannan lämmityksen ominaisenergiankulutus (lämmitysenergia rakennuskuutiota kohti) on pudonnut lähes puoleen. Sama kehitystrendi on havaittavissa myös kaukolämpöverkkoon liitettyjen rakennusten ominaisenergiankulutuksessa, joka on pienentynyt 30 viime vuoden aikana 30 %. Tätä kehitystrendiä ovat tukeneet sekä tiukentuneet rakentamismääräysten energiatehokkuusvaatimukset että energian hinnan nousu. Samaan aikaan kiinteistöjen sähkön käyttö asukasta kohti on kasvanut hyvin voimakkaasti. Sähkön käytön voimakasta kasvua selittävät erityisesti sekä yleinen elintason nousu että rakennusten varustelutason paraneminen.

6.2 Rakennusten lämmityksen ja talotekniikan energiansäästöpotentiaali

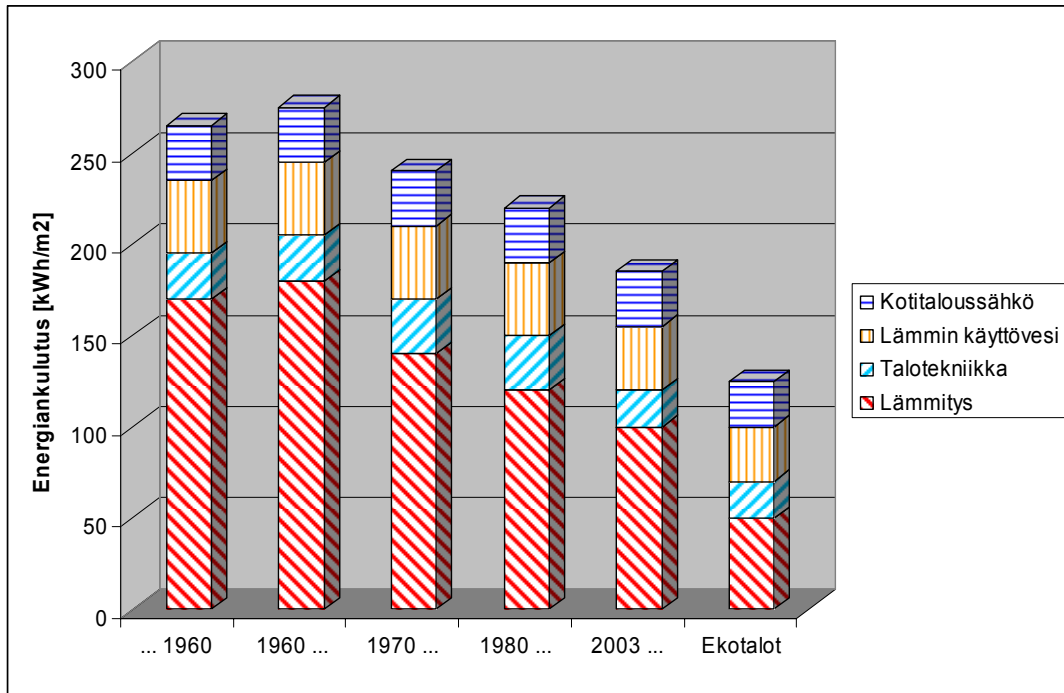
6.2.1 Rakennusteknologioiden ja rakennuskannan kehitys

Lukuisissa koerakennusprojekteissa sekä markkinaperustaisen rakentamisen seuranta-hankkeissa on selvitetty rakennusten lämmitysenergian tarpeen pienentämistä sekä tähän tarvittavien investointien suuruutta. Näiden selvityksen tuloksena on todettu, että nykytekniikalla voidaan varsin helposti puolittaa uudisrakennusten lämmitysenergian

tarve (suhteessa voimassa olevien rakentamismääräysten minimitasoon), ja tarvittava lisäinvestointi on suuruusluokaltaan 3–5 % kokonaisrakentamiskustannuksista. Tulevaisuuden matalaenergiaratkaisuisissa (jotka edellyttävät erityisen huolellista rakennuksen energiateknistä suunnittelua ja toteutusta) rakennusten lämmitysenergian tarvetta voidaan pienentää suuruusluokaltaan 70 %, ja tällaisten ratkaisujen (passiivitalo) edellyttämäksi lisäinvestoinniksi on ensimmäisten käytännön kokemusten perusteella arvioitu noin 10 % rakentamisen kokonaiskustannuksista.



Kuva 6.4. Kiinteistön energiatehokkaan rakentamisen säästöpotentiaali ja suhteelliset investointikustannukset. (Perinteiset ratkaisut: vallitsevat rakentamiskäytännöt – s.o. useimmiten ainoastaan kansallisten rakentamismääräysten minimitaso; Matalaenergiaratkaisut nykytekniikalla: ammattimainen suunnittelu ja toteutus markkinoilta saatavilla tuotteilla; Tulevaisuuden matalaenergiaratkaisut: nimenomaisesti energiatehokkuuteen tähtäävä suunnittelu ja toteutus sekä aktiivinen energiatehokkuutta parantavien käytäntöjen ja teknologian hyödyntäminen).



Kuva 6.5. Suomen rakennuskannan keskimääräiset energiankulutukset rakennusten ikäjakamaan mukaan ja kulutuslajeittain esitettynä.

Kuvassa 6.5 ja taulukossa 6.1 on esitetty Suomen rakennuskannan energiansäästöpotentiaalin arvioinnin lähtötiedoksi kerättyä tausta-aineistoa rakennusten ikäjakamaan ja kulutuslajeittain esitettynä. Yksi merkittävä säästöpotentiaali löytyy ennen vuotta 1980 valmistuneiden rakennusten lämmitysenergian kulutuksen pienentämisestä korjausrakentamisen yhteydessä. Tällaisissa hankkeissa on perusteltua parantaa ulkovaipan lämmöneristysominaisuuksia rakenneteknisillä ratkaisulla sekä pienentää erityisesti ilmanvaihdon energiankulutusta moderneilla laiteteknisillä keinoilla.

Taulukko 6.1. Suomen rakennuskannan energiankulutus – paljonko eri aikakausina rakennetut asuintalot kuluttavat.

Kulutus	... 1960	1960 ...	1970 ...	1980 ...	2003 ...	Ekotalot
Energia hyvän sisäilman lämpötilan ylläpitämiseen, kWh/m² vuodessa						
Lämmitys	160–180	160–200	120–160	100–140	80–120	40–60
Laitteistojen sähkönkulutus, kWh/m² vuodessa						
Talotekniikka	20–30	20–30	20–40	20–40	10–30	10–30
Asukkaiden energiankulutus, kWh/m² vuodessa						
Lämmin vesi	20–60	20–60	20–60	20–60	20–50	20–40
Kotitaloussähkö	20–40	20–40	20–40	20–40	20–40	20–30
Yhteensä, kWh/m² vuodessa						
Asuminen	220–310	220–330	180–300	160–280	130–240	90–160

Tulevina vuosikymmeninä koko rakennussektorin energiankäytön tehostamispotentiaaliin vaikuttavat keskeisimmin (i) rakennuskannan volyymin muutokset (uudis- ja korjausrakentaminen sekä rakennusten poistuma), (ii) rakentamismääräysten kehitys (erityisesti energiatehokkuuden vähimmäisvaatimukset) sekä (iii) talouden yleinen kehitys (energian hinta sekä investointikustannusten muutokset).

Suomen rakennuskannan koko vuonna 2007 oli noin 496 milj.m². Vuonna 2020 rakennuskannan arvioidaan olevan 546 milj.m² ja vuonna 2050 yhteensä 559 milj.m². Suomessa talonrakentamisen uudistuotannon määrä vuosittain suhteessa koko rakennuskantaan on 1,5–2 %. Poistuman määrä talotyypeittäin vaihtelee 0,3–2 % ja on keskimäärin 1 %. Rakennuskannan tilavuus kasvaa siten vuosittain 0,5–1 %.

Taulukko 6.2. Suomen rakennuskanta vuosina 2007–2050.

RAKENNUSKANTA VUOSINA 2007–2050 [1000-m ²]	2007	2020	2050
OMAKOTITALOT	142 000	163 800	180 200
RIVITALOT	30 600	34 000	35 800
ASUINKERROSTALOT	85 600	94 700	95 200
VAPAA-AJAN ASUINRAKENNUKSET LIIKE- JA TOIMISTORAKENNUKSET (SIS LIIKENTEEN JA MUUT)	21 500	23 600	26 600
JULKISET PALVELURAKENNUKSET	65 100	75 100	83 400
TUOTANTORAKENNUKSET	36 700	37 000	36 000
	114 900	118 000	101 700
Kaikki rakennukset yhteensä	496 400	546 200	558 900

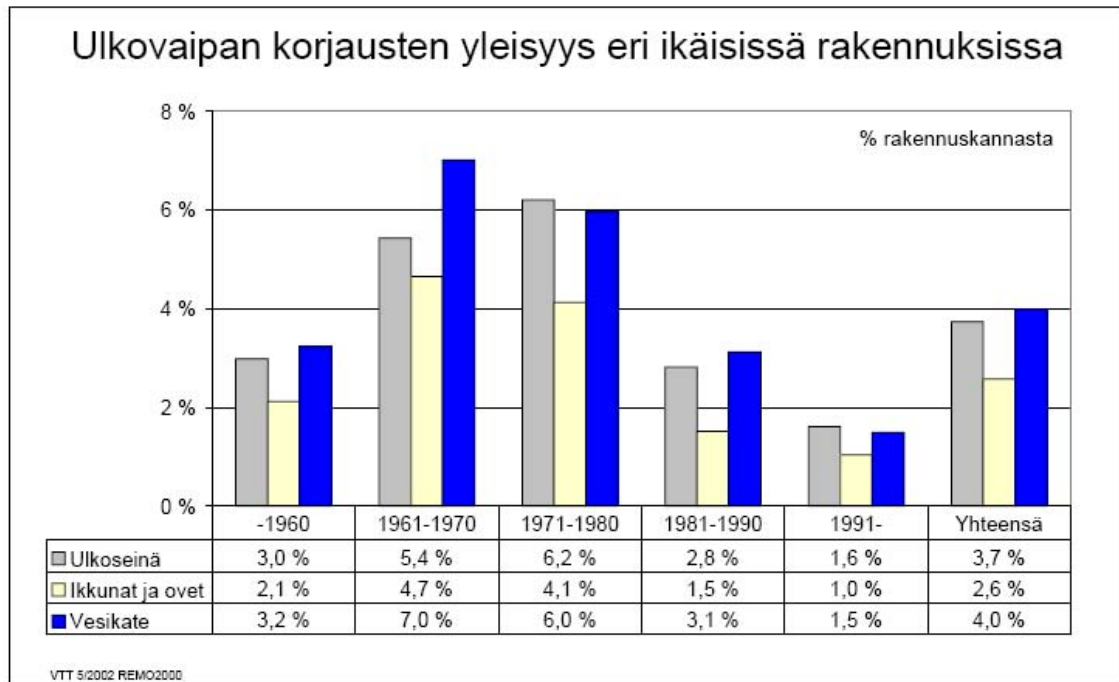
Taulukko 6.3. Suomen rakennuskannan poistumat ja uudistuotanto vuosina 2007–2050.

RAKENNUSKANTA KERROSALA VUOSINA 2007–2050	POISTUMA	UUDIS-	POISTUMA	UUDIS-
	2007 - 2020	TUOTANTO 2007–2020	2020- 2050	TUOTANTO 2020–2050
	1000-m ²	1000-m ²	1000-m ²	1000-m ²
OMAKOTITALOT	8 100	29 900	44 800	61 200
RIVITALOT	1 400	4 800	9 200	11 000
ASUINKERROSTALOT	2 400	11 500	20 100	20 600
VAPAA-AJAN ASUINRAKENNUKSET LIIKE- JA TOIMISTORAKENNUKSET (SIS LIIKENTEEN JA MUUT)	2 700	4 800	7 200	10 200
JULKISET PALVELURAKENNUKSET	12 000	22 000	33 100	41 400
TUOTANTORAKENNUKSET	5 700	6 000	13 300	12 300
	21 300	24 400	60 400	44 100
KAIKKI RAKENNUKSET YHTEENSÄ	53 600	103 400	188 100	200 800

Eri rakennustyyppien välille ennustetaan jonkin verran toisistaan poikkeavaa kehitystä. Omakotitalokannan arvioidaan lisääntyvän 15 % aikavälillä 2007–2020 ja peräti 27 % aikavälillä 2007–2050. Myös rivitalo-, asuinkerrostalo- ja vapaa-ajan asuinrakennuskantojen ennustetaan kasvavan sekä vuoteen 2020 (noin 10 % kukin) että vuoteen 2050 mennessä (17 %, 11 % ja 24 %) vuoden 2007 kannasta. Samoin liike- ja toimitilarakennuskannan arvioidaan kasvavan (2007–2020: 15 % ja 2007–2050: 28 %). Julkisten palvelurakennusten kannan arvioidaan pysyvän lähes ennallaan (2007–2020: 1 % ja 2007–2050 -2 %), mutta tuotantorakennuskannan arvioidaan ensin hieman kasvavan (2007–2020: 3 %) ja kääntyvän sitten laskuun (2007–2050: -11 %). Koko Suomen rakennuskannan arvioidaan kasvavan 10 % aikavälillä 2007–2020 ja 13 % ajanjaksolla 2007–2050.

Suomen rakennuskannan ulkovaipan korjausten yleisyys vaihtelee luonnollisesti rakennusten iän mukaan. Vuosien 1960–1980 välisellä ajanjaksolla tapahtuneen voimakkaan

lähiörakentamisen rakennukset ovat joko jo tulleet tai ovat monilta osin tulossa korjausrakentamisvaiheeseen. Myös ulkovaipan eri osien (ulkoseinä, ikkunat ja ovet sekä vesikate) korjausten yleisyys vaihtelee jonkin verran, mutta joka tapauksessa vuosittain korjausrakentamisen piirissä on 3–4 % olemassa olevasta rakennuskannasta.



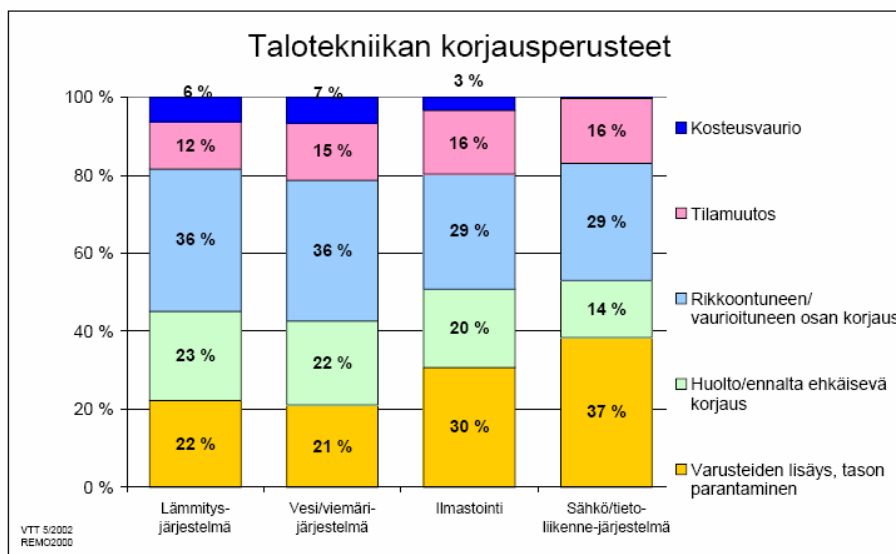
Kuva 6.6. Suomen rakennuskannan ulkovaipan korjausten yleisyys eri ikäisissä rakennuksissa. (Vainio et al. 2002)

Talotekniikkakorjausten yleisyys Suomen rakennuskannassa vaihtelee voimakkaasti rakennuksen iän ja korjausperusteiden mukaan. Keskimäärin koko valtakunnan rakennuskannassa tehdään lämpö- ja vesikorjausrakentamista 18,2 %:ssa, ilmastoinnin korjausrakentamista 3,2 %:ssa ja sähköistykseen liittyvää korjausrakentamista 8,0 %:ssa rakennuksia. Erityisesti lämmitys- ja vesihuoltopuolen korjausrakentaminen on varsin laajaa, joten hyvällä suunnittelulla ja systemaattisella toteutuksella rakennuskannan energiatehokkuuden parantamiselle on kohtuullisen hyvät edellytykset kohtuullisella aikajänteellä.

Lämmitysjärjestelmien korjausperusteina ovat tyypillisesti rikkoontuneen tai vaurioituneen osan korjaus (36 % tapauksista), huolto tai ennalta ehkäisevä korjaus (23 % tapauksista) sekä varusteiden lisäys ja tason parantaminen (22 % tapauksista). Valtaosassa lämmitysjärjestelmien korjausrakentamista voidaankin varsin kohtuullisilla lisäkustannuksilla samalla parantaa myös rakennusten energiatehokkuutta.

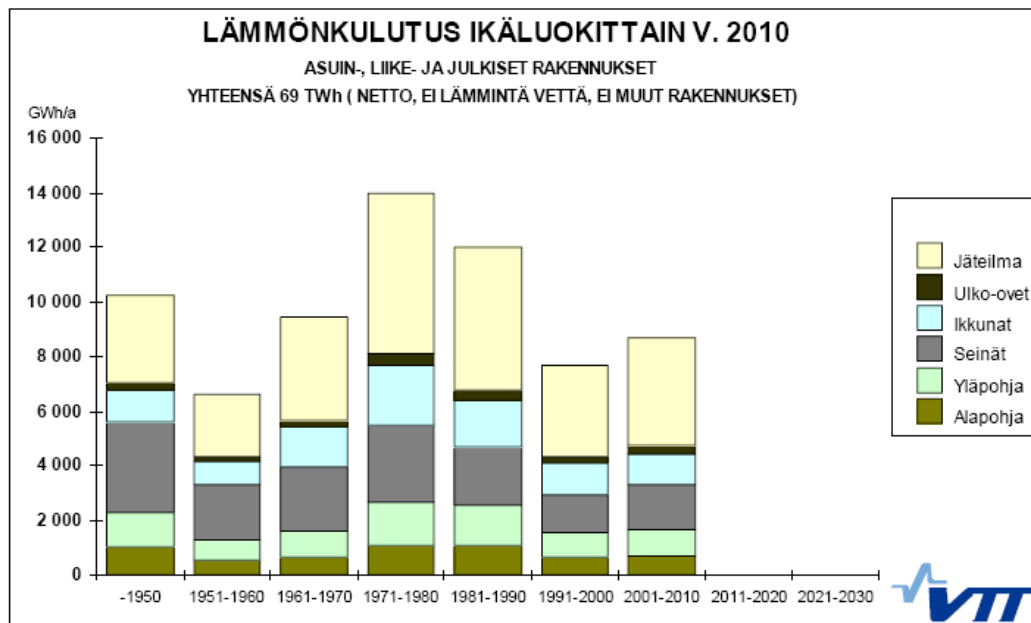


Kuva 6.7. Suomen rakennuskannan talotekniikkakorjausten yleisyys eri ikäisissä rakennuksissa. (Vainio et al. 2002)



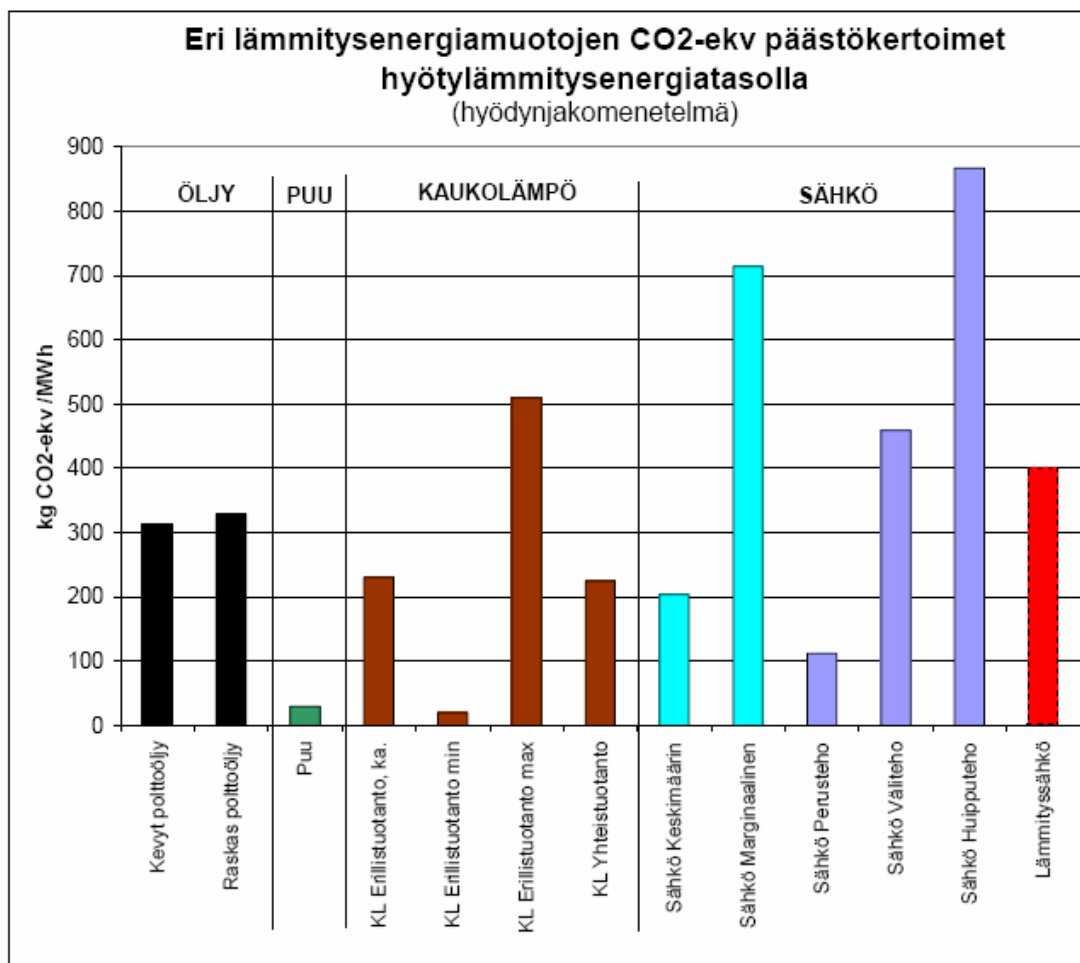
Kuva 6.8. Suomen rakennuskannan talotekniikan korjausperusteet. (Vainio et al. 2002)

Olemassa olevan rakennuskannan lämmönkulutusta on tilastoitu ikäluokittain ja kulu-
tustlajeittain. Tehtyjen tilastojen perusteella peruskorjausikäen tulleiden tai siihen tulossa
olevien rakennusten (rakennusvuodet 1960–1990) energiatehokkuuden parantamispoten-
tiaali on varsin suuri. Suositeltavia korjausrakentamisen toimenpiteitä ovat ulkovi-
pan lisälämmöneristys sekä ikkunoiden ja erityisesti ilmanvaihdon energiatehokkuuden
parantaminen. Ilmanvaihdon osalta korjausrakennushankkeiden yhteydessä on suositel-
tavaa harkita koneellista ilmanvaihtoa, joka on varustettu tehokkaalla lämmöntal-
teenotolla.



Kuva 6.9. Suomen rakennuskannan lämmönkulutus ikäluokittain. (Heljo et al. 2005)

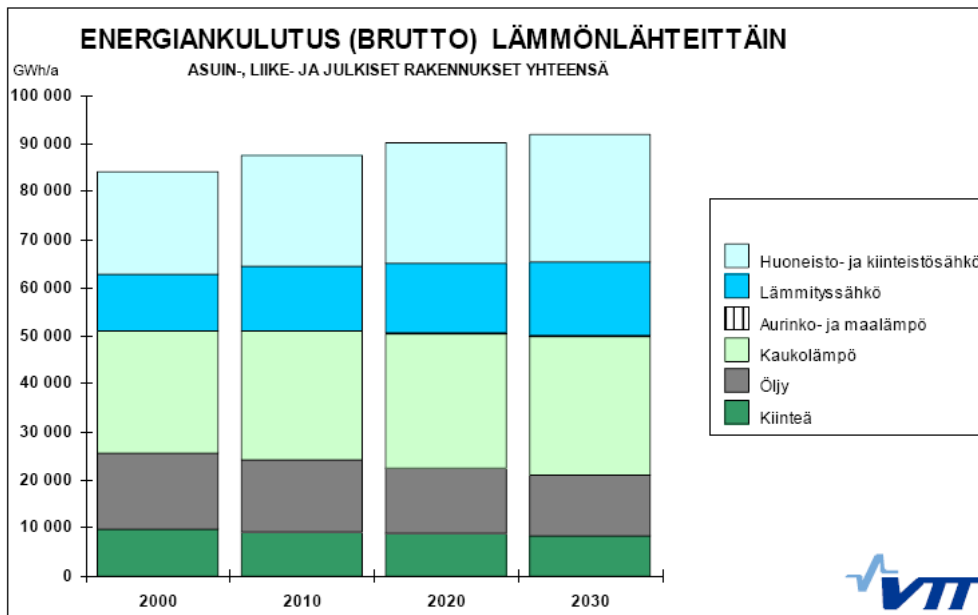
Rakennusten vaihtoehtoisten lämmitysenergiamuotojen ympäristövaikutuksia on arvioitu lukuisissa kansallisissa ja kansainvälisissä tutkimushankkeissa. Ympäristönäkökulmasta tarkasteltuna ylivoimaisesti paras vaihtoehto on puun käyttö – mikä kylläkin edellyttää polttotekniikan hyvää hallintaa. Kevyen ja raskaan polttoöljyn kasvihuonekaasupäästöt ovat selvästi hallittua puunkäyttöä korkeammat (yli 300 kg CO₂-ekv/MWh). Kaukolämmön päästökertoimet vaihtelevat huomattavan paljon, ja päästökertoimet riippuvat paitsi tuotantotavasta (lämmön erillis- vai yhteistuotanto), myös siitä, tarkastellaanko perus- vai huippukuorman tuotantoa. Päästökertoimia tarkasteltaessa rakennusten lämmitysenergiamuotojen vertailussa huonoin vaihtoehto on sähkölämmitys. Erityisesti huipputehon aikaisen sähkön tuotannon päästökerroin on muita vaihtoehtoja selvästi korkeampi (lähes 900 kg CO₂-ekv/MWh).



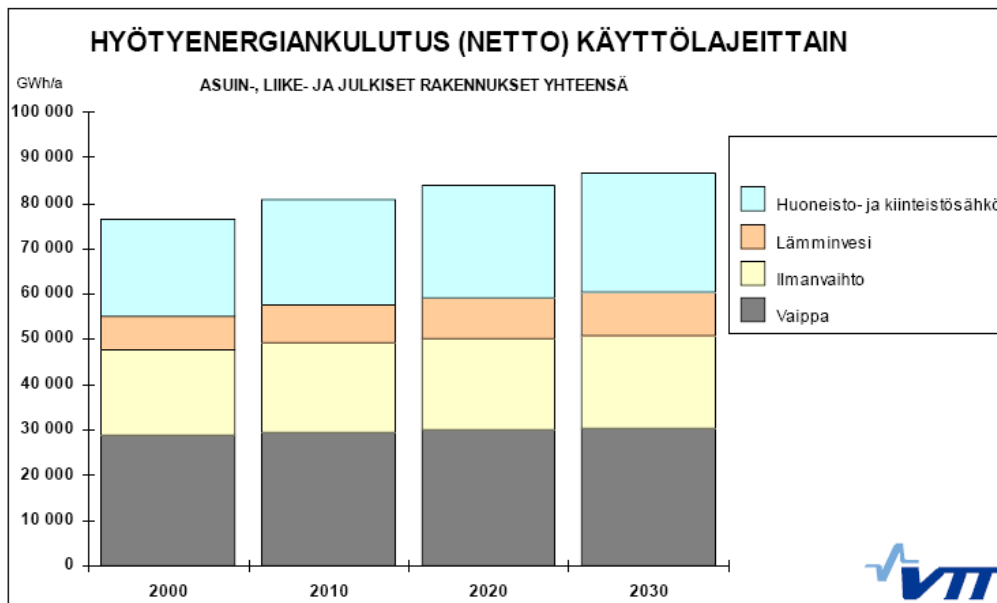
Kuva 6.10. Rakennusten eri lämmitysmuotojen CO₂-ekv-päästökertoimet hyötylämmitysenergiatasolla. (Heljo et al. 2005)

Asuin-, liike- ja julkisten rakennusten energiankulutuksen (brutto) kehityksestä on laadittu ennusteita (kuva 6.11). Yhden ennusteen mukaan kiinteän polttoaineen sekä öljyn absoluuttiset määrät ja suhteelliset osuudet tulevat vähenemään. Sen sijaan kaukolämmön, lämmitys­sähkön ja erityisesti huoneisto- ja kiinteistösähkön määrät ja osuudet ovat ilman energiankäytön tehostamistoimenpiteitä kasvussa.

Myös asuin-, liike- ja julkisten rakennusten hyötyenergiankulutuksen (netto) kehityksestä on laadittu ennusteita (kuva 6.12). Vaikka asumisväljyyden on ennustettu lisääntyvän, on rakennusten vaipan energiankulutuksen ennustettu pysyvän lähes nykyisellä tasolla. Samoin ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden arvioidaan yleisesti pysyvän ainakin lähellä nykyistä tasoaan. Sen sijaan huoneisto- ja kiinteistösähkön kulutuksen ennakoitaan kasvattavan sekä määräänsä että suhteellista osuuttaan ilman erillistoimenpiteitä.



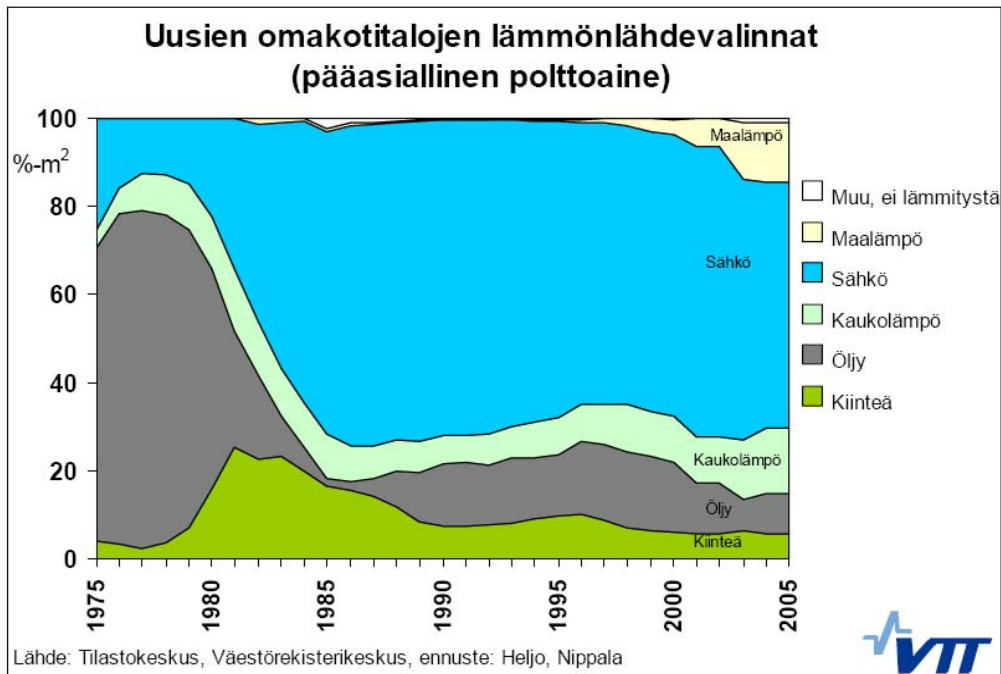
Kuva 6.11. Energiankulutus lämmönlähteittäin. (Heljo et al. 2005)



Kuva 6.12. Hyötyenergiankulutus käyttölajeittain. (Heljo et al. 2005)

Uudisrakentamisessa erityisesti asuinkerrostalojen ja toimistorakennusten lämmönlähddevalinnat (pääasiallinen polttoaine) ovat kehittyneet erittäin voimakkaasti kaukolämmön suuntaan. Kaukolämmön osuus (rakennusneliöihin suhteutettuna) uusissa asuinkerrostaloissa ja toimistorakennuksissa on yli 95 %. Sen sijaan omakotitalojen lämmönlähddevalinnoissa ei toistaiseksi ole tapahtunut merkittäviä muutoksia. Maalämmön ja ylipäätään lämpöpumppujen käyttö on kylläkin yleistynyt omakotirakentamisessa viime vuosien aikana selvästi. Eri lämmönlähddevalintojen tarkasteltaessa on kuitenkin syytä

tiedostaa, että tilastoinnissa käytetään luokitteluperusteena nimenomaan pääasiallista polttoainetta. Vaikka esimerkiksi sähkölämmitteisessä omakotitalossa käytettäisiin huomattaviakin määriä polttopuuta lämmöntarpeen tyydyttämiseen, ei tällainen käyttö ilmene millään tavalla näissä tilastoissa.

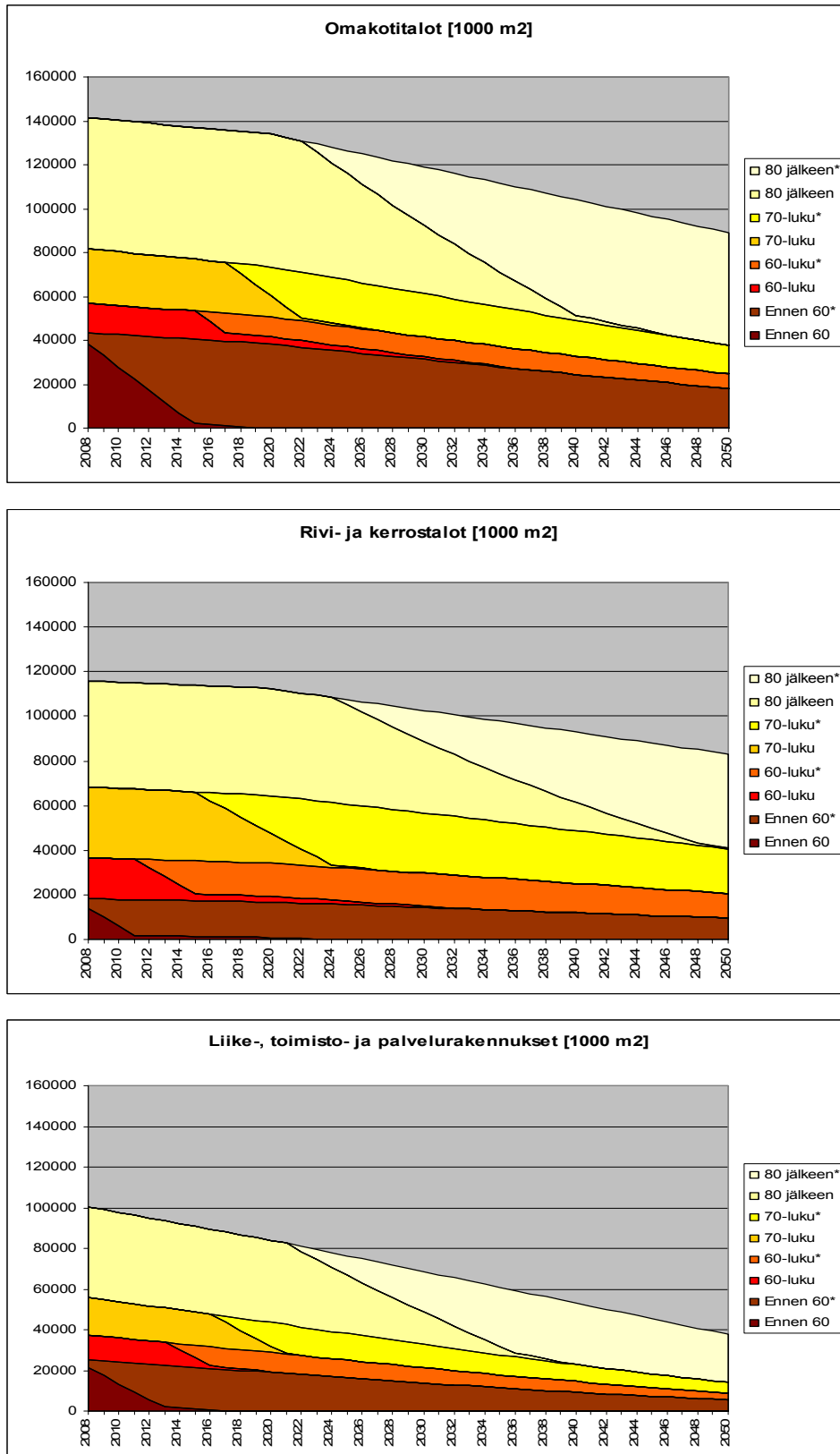


Kuva 6.13. Uusien omakotitalojen lämmönlähdevalinnat. (Heljo et al. 2005)

6.2.2 Energiansäästöskenaarioita

Tässä kappaleessa arvioidaan teknistä energiansäästöpotentiaalia rakennusten lämmityksessä ja talotekniikassa uudis- ja korjausrakentamisen eri toimenpiteille. Rakennuskannan ja -teknologioiden kehitysarvioiden perusteella on muodostettu erikseen optimistinen skenaario, jossa oletetaan teknologisten keinojen nopeampi kehittyminen ja käyttöönotto ja varovainen skenaario, jossa vastaava kehitys on hitaampaa. Skenaariot edustavat rakennusten lämmitys- ja talotekniikan toimenpiteiden teknistä potentiaalia, eli niissä ei ole huomioitu toimenpiteiden kustannuksia eikä niitä ole verrattu muiden sektoreiden toimenpiteiden kustannuksiin.

Kuvassa 6.14 on esitetty energiansäästöpotentiaalın arvioinnissa käytetyt korjausrakentamisen volyymit. Perusoletuksena on käytetty 3,5 %:n korjausvolyyymiä, ja korjaustoimenpiteet on oletettu kohdistettavan eri ikäisille rakennuksille ikäjärjestyksessä vanhimmista uusimpiin rakennuksiin. Kuvaaajissa on esitetty näillä oletuksilla eri-ikäisten rakennusten korjaamattomien (tummempi sävy) ja korjattujen (vaaleampi sävy) rakennusten kokonaispinta-alat.



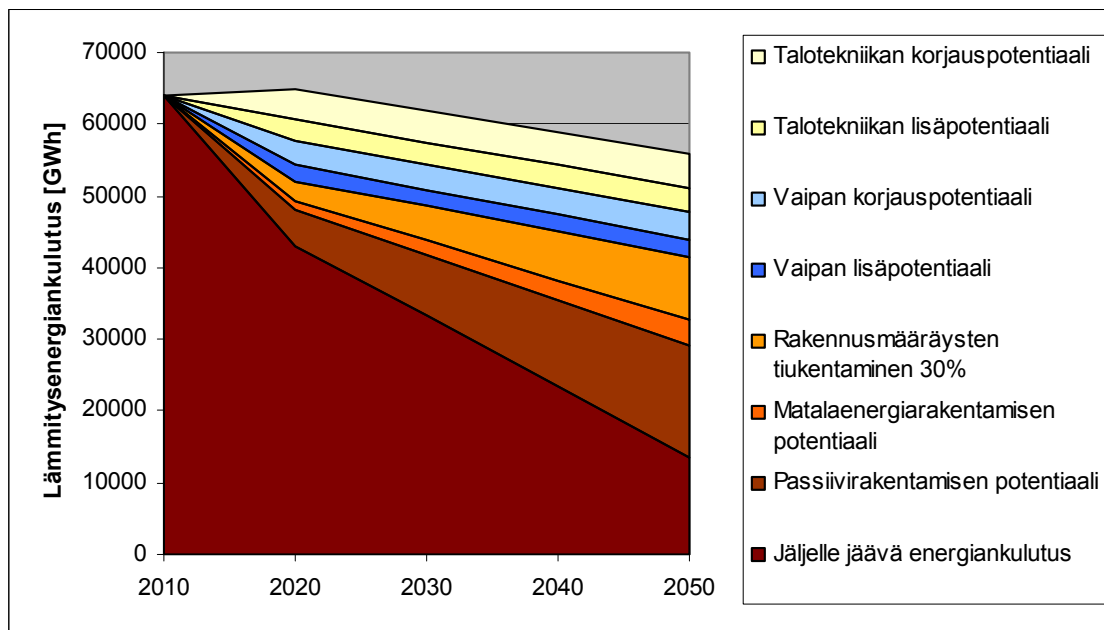
Kuva 6.14. Rakennuskannan energiansäästöpotentiaalin laskennassa käytetyt eri ikäisten rakennusten korjausrakentamisen volyymit ja aikataulus. Oletuksena keskimäärin 3,5 % korjausrakentamista vuodessa.

Korjausrakentamisessa on arvioitu kahden merkittävimmän toimenpiteen (ulkovaipan lämpöhäviöiden kompensoiminen ja ilmanvaihdon energiankulutus) vaikutuksia rakennuskannan lämmitysenergiankulutukseen. (Tässä yhteydessä lämmitysenergiankulutus ei siis pidä sisällään esimerkiksi lämpimän käyttöveden lämmitysenergiatarvetta.)

Ulkovaipan varovaista korjauspotentiaalia arvioitaessa on oletettu, että rakenteiden keskimääräinen lämmöneristysominaisuus paranee kolmasosalla (esimerkiksi ulkovaipan U-arvo arvosta $0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ arvoon $0,2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Yhdistämällä tämä parannusoletus ulkovaipan osuuteen keskimääräisestä lämmitysenergiatarpeesta (70 %) saadaan korjausrakentamisen efektiiviseksi energiakertoimeksi 0,762 (23,8 %:n parannus) varovaisessa arviossa. Optimistisessa ulkovaipan energiatehokkuuden parannusarviossa on oletettu yli 50 %:n parannus lämmöneristävytyteen (esimerkiksi korjatun ulkoseinän U-arvo $0,12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$), jolloin efektiiviseksi energiakertoimeksi saadaan 0,671 (32,9 %:n parannus).

Talotekniikan korjauspotentiaalia arvioitaessa on oletettu, että korjattavissa kohteissa otetaan käyttöön lämmöntalteenotolla varustettu koneellinen ilmanvaihto niin, että varovaisessa arviossa parannetaan keskimäärin 10 % ilmanvaihdon energiatehokkuutta (energiakerroin 0,97) ja optimistisessä korjausrakentamisessa keskimäärin 50 % (energiakerroin 0,85).

Uudisrakentamisen osalta perusskenaarion lähtökohdaksi on oletettu, että kaikki uudisrakentaminen toteutetaan vuoden 2003 rakentamismääräysten mukaisella tasolla. Tällöin rakennuskannan poistuvan rakennuskannan ja tätä energiatehokkaamman uudisrakentamisen yhteisvaikutuksena koko rakennuskannan lämmitysenergiankulutus alkaa vähentyä vuoden 2020 jälkeen (kulutus vuonna 2020 65 000 GWh/a ja vuonna 2050 56 000 GWh/a). Lämmitysenergian säästöpotentiaalia arvioitaessa ensimmäinen toimenpide on rakentamismääräysten tiukentaminen 30 % vuoden 2010 alusta alkaen. Toinena uudisrakentamisen säästöpotentiaalin toimenpiteenä on arvioitu matalaenergiarakentamisen (50 %:n parannus vuoden 2003 normitasoon verrattuna) lisäsäästöpotentiaalia, ja kolmantena toimenpiteenä passiivienergiarakennusten (70 %:n parannus vuoden 2003 normitasoon verrattuna) lisäpotentiaalia.



Kuva 6.15. Suomen koko rakennuskannan lämmitysenergiakulutuksen (N.B. ulkovaipan ja ilmanvaihdon energiankulutus – ei sisällä lämpimän käyttöveden tuottamista) arvioitu säästöpotentiaali eri säästötoimenpiteillä.

Taulukko 6.4. Eri teknologioiden ja toimenpiteiden arvioidut energiansäästöpotentiaalit varovaisessa kehitysarviossa.

Toimenpide / teknologia	Arvio energiansäästöpotentiaalista [GWh/a]	
	2020	2050
Energiankulutus ilman energiansäästötoimenpiteitä (olettamalla, että kaikki uudisrakentaminen toteutetaan vuoden 2003 normistolla)	65 000	56 000
Uudisrakentaminen		
Rakentamismääräysten tiukentaminen (-30 % vuonna 2010)	2 700 (-4 %)	8 800 (-16 %)
Matalaenergiarakentamisen muuttaminen vallitsevaksi käytännöksi	1 400 (-2 %)	3 700 (-7 %)
Korjausrakentaminen		
Ulkovaipan energiatehokkuuden parantaminen korjausrakentamisen yhteydessä	3 100 (-5 %)	3 600 (-6 %)
Talotekniikan energiatehokkuuden parantaminen korjausrakentamisen yhteydessä	4 100 (-6 %)	4 700 (-8 %)
Energiansäästöpotentiaali yhteensä	11 300 (-17 %)	20 800 (-37 %)
Energiankulutus KAIKKIEN energiansäästötoimenpiteiden jälkeen	53 700	35 200

Taulukko 6.5. Eri teknologioiden ja toimenpiteiden arvioidut energiansäästöpotentiaalit optimistisessa kehitysarviossa.

Toimenpide / teknologia	Arvio energiansäästö- potentiaalista [GWh/a]	
	2020	2050
Energiankulutus ilman energiansäästötoimenpiteitä (olettamalla, että kaikki uudisrakentaminen toteutetaan vuoden 2003 normistolla)	65 000	56 000
Uudisrakentaminen		
Rakentamismääräysten tiukentaminen (-30 % vuonna 2010)	2 700 (-4 %)	8 800 (-16 %)
Passiivirakentamisen muuttaminen vallitsevaksi käytännöksi	6 300 (-10 %)	19 200 (-34 %)
Korjausrakentaminen		
Ulkovaipan energiatehokkuuden parantaminen korjausrakentamisen yhteydessä	5 300 (-8 %)	6 100 (-11 %)
Talotekniikan energiatehokkuuden parantaminen korjausrakentamisen yhteydessä	7 400 (-11 %)	8 300 (-14 %)
Energiansäästöpotentiaali yhteensä	21 700 (-33 %)	42 400 (-76 %)
Energiankulutus KAIKKIEN energiansäästötoimenpiteiden jälkeen	43 300	13 600

Sekä taulukossa 6.4 (varovainen kehitysarvio) että taulukossa 6.5 (optimistinen kehitysarvio) esitettyjen rakennusten (ulkovaipan ja ilmanvaihdon) lämmitysenergian energiansäästöpotentiaalin arvioiden perusteella voidaan ensiksikin todeta, että rakennussektorilla on kymmenien prosenttien tekninen säästöpotentiaali (11–42 TWh/a). Toinen merkittävä havainto on, että energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden vaikutukset näkyvät huomattavalla viiveellä, koska rakennuskanta uusiutuu hitaasti (uudisrakentamisen volyyymi on 1–1,5 %/a ja korjausrakentamisen volyyymi 3,5 %/a).

6.2.3 Johtopäätöksiä

Rakennusten lämmityksen energiatehokkuuden parantamisen lähtötilanne on kokonaisuutena varsin hyvä. Alalla jo on kehitetty erityisesti uudisrakennuspuolelle toimivia konsepteja varsinkin ulkovaipan ja ilmanvaihdon lämmitysenergian tarpeen merkittäväksi pienentämiseksi, ja monet ratkaisut ovat kaupallisesti jo tällä hetkellä saatavissa. Näiden teknisesti toimivien ratkaisujen käyttöönottoa tulisi kuitenkin nopeuttaa eri keinoin (mm. rakennusten energiamääräysten tiukentaminen, suunnittelijakunnan koulutuksen kehittäminen tarjonnan varmistamiseksi, selkeä tiedotus vaativan kuluttajakunnan synnyttämiseksi).

Olemassa olevan ja korjausikään tulevan rakennuskannan energiatehokkuuden parantamisella näyttää olevan koko valtakunnan tasolla vähintään yhtä suuri vaikutuspotentiaali kuin uudisrakentamisella. Korjausrakentamiseen tarvitaan kuitenkin sekä uusia palvelujen tarjoajia että korjausrakentamisen eri osapuolten (omistaja/tilaaja, urakoitsija, huoneiston/rakennuksen haltija) tarpeet huomioivia uusia korjausrakentamisen konsepteja energiatehokkuuden parantamiseksi kokonaisuuden kannalta hallitusti ja kustannustehokkaasti. Näihin tavoitteisiin päästään sekä tutkimuksen ja tuotekehityksen että hyvin suunniteltujen ja toteutettavien julkisen vallan tukitoimenpiteiden avulla.

Rakennussektorilla erilaisten energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden kustannusvaikutuksista ei ole olemassa kattavaa tutkittua tietoa. Uudisrakennuspuolelta kustannustietoa on jonkin verran kerättyä (esimerkiksi matalaenergiarakentamisen lisäinvestointikustannus on tyypillisesti 50–100 €/m² kohteesta riippuen), mutta erilaisten korjausrakennushankkeiden todellisista energiatehokkuuden parantamisesta aiheutuneista toteutuneista lisäkustannuksista ei ole tarkkoja selvityksiä käytettävissä.

Matalaenergiarakentamisen teknologia on kypsymässä rakennusmarkkinoilta saataviksi palveluiksi, mutta todellinen läpimurto edellyttää vielä markkinoiden kehittymistä (kysynnän ja tarjonnan tasapainon löytäminen). Teknologiapuolella kehitettävää on kuitenkin vielä erityisesti energiatehokkaassa passiivirakentamisessa sekä mahdollisimman tehokkaasti toimivien teknis-taloudellisten palvelukokonaisuuksien kehittämisessä.

6.3 Sähkölaitteet ja valaistus

Tässä kappaleessa käsitellään kotitalouksien ja palveluiden sähkölaitteiden ja valaistuksen teknologioita. Tarkastelussa keskitytään niihin kohteisiin, joissa on näköpiirissä merkittävin uuden teknologian avulla potentiaalisesti saavutettava energiansäästö. Myös käyttökohteet ja laiteryhvät, joissa selkeä teknologian muutos on nähtävissä, ovat erityisen huomion kohteena.

Tarkasteltaessa säästötoimenpiteiden kokonaisvaikutuksia energiajärjestelmään tulee huomioida, että valaisimet ja sähkölaitteet tuottavat toimiessaan aina lämpöä ensisijaisen tarkoituksensa lisäksi. Tämä lämpö tulee osittain hyödynnetyksi rakennusten lämmityksessä. Laitelämmön hyödyntäminen on sitä suurempaa, mitä parempi lämmityksen säätöjärjestelmä on käytössä. Laitelämmön vaikutus kokonaisuudessa saavutettavaan energiansäästöön on merkittävä Suomessa, koska lämmityskausi on pitkä. (KTM 2001; Korhonen et al. 2002)

Perinteisesti sähkölaitteiden ja valaistuksen teknisiä energiansäästömahdollisuuksia on tarkasteltu laiteryhmittäin karkeasti kuvattuna siten, että arvioidaan nykyisen laitekan-

nan kulutus, ja oletetaan, että laitekannasta poistuvat iäkkäimmät laitteet korvautuvat energiatehokkaimmalla tunnetulla teknologialla niiden tullessa käyttöikänsä päähän (esim. Korhonen et al. 2002). Verrattaessa tällä tavalla arvioitua laiteryhmiä energiankulutuksen kehitystä tapaukseen, jossa energiatehokkuus säilyy nykyisellä tasolla, saadaan energiatehokkaan teknologian vaikutus arvioitua.

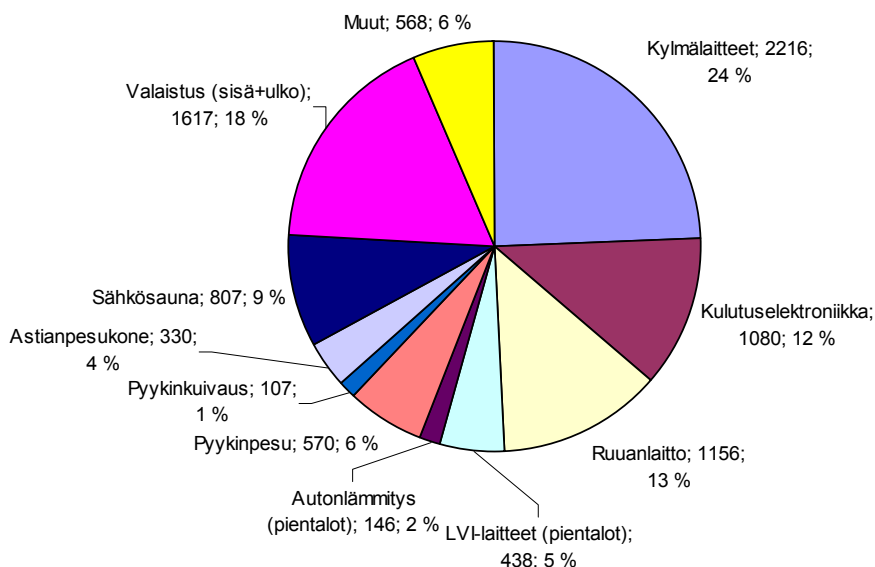
Pitkälle tulevaisuuteen ulottuvat tarkastelut koko sähkölaitteiden ja valaistuksen laitekannan kulutuksen analysoimiseksi edellä kuvatulla tavalla ovat epävarmoja. Tämä johtuu siitä, että laitekannat ehtivät uusiutua moneen kertaan, ja tulevaisuudessa on todennäköisesti käytössä laitteita ja teknologioita, joiden käyttötarkoitusta ja ominaisuuksia ei vielä tunneta. Perustarpeiden tyydyttämiseen tarvittavien laitteiden, joiden käyttöikä on suhteellisen pitkä, kuten esimerkiksi kylmäsäilytykseen ja valaistukseen käytettävien sähkölaitteiden kohdalla, on perustelluinta olettaa, että nykyisen kaltaisia laitteita on käytössä vielä vuonna 2050.

6.3.1 Kotitaloudet

Yleistä

Kotitalouksien sähkönkulutus muuhun kuin lämmitykseen Suomessa vuonna 2005 oli 10 319 GWh (Tilastokeskus 2006a). Tämän ns. kotitaloussähkön kulutus on ollut jatkuvasti kasvussa. Vuosina 2000–2005 kulutus kasvoi yhteensä noin 14 %. Tarkkoja vuositilastoja kotitalouksien sähkönkulutuksen jakautumisesta eri laiteryhmiä välillä ei ole olemassa.

Huomattava osa kotitaloussähkön kulutuksen viime vuosien kasvusta selittyy pientalojen kasvaneesta sähkönkulutuksesta. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat pientalojen yhä parempi varustelutaso ja kasvanut asumisväljyys. Kerros- ja rivitalojen kotitaloussähkön kulutuksen kasvu ei ole ollut yhtä nopeaa. (Rouhiainen 2008)



Kuva 6.16. Kotitaloussähkön jakauma, yhteensä 9 035 GWh vuonna 2000, energia (GWh) ja suhteellinen osuus (%) kokonaisuudesta. Viime vuosina vallinneeksi suuntaukseksi on arvioitu, että kylmälaitteiden sähkönkulutus ja sen osuus ovat olleet laskussa, kun taas kulutuselektroniikan sähkönkulutuksen arvioidaan kasvaneen voimakkaasti. (Korhonen et al. 2002)

Merkittävimmät kotitaloussähköä kuluttavat laiteryhmittä ovat olleet kylmälaitteet, valaistus, ruuanlaitto ja kulutuselektroniikka (kuva 6.16). Kehityssuuntaus, jossa yhä suurempi osa kotitaloussähköstä kuluu kulutuselektroniikkalaitteissa, kuten televisioissa, tietokoneissa, DVD-laitteissa, digibokseissa jne., on ollut nähtävissä viime vuosina. Tähän on vaikuttanut kulutuselektroniikkalaitteiden yleistymisen ja uudenlaisten laitteiden tulo markkinoille. Kylmälaitteiden osuus kotitalouksien sähkönkulutuksesta on pienentynyt. (Korhonen et al. 2002)

Uusien laitteiden parantunut energiatehokkuus verrattuna aikaisempien sukupolvien laitteisiin on kompensoinut kasvaneen laitekannan aiheuttamaa energiankulutuksen kasvua. Huomioitavaa on, että useimpien kotitalouksien sähkölaitteiden laitekanta ehtii uusiutumaan moneen kertaan vuoteen 2050 mennessä, sillä pitkäikäisimpienkin laitteiden teknisenä käyttöikä on käytetään noin 15 vuotta (EuP 2008). Laitekannan uusiutuminen mahdollistaa energiansäästön uudempaan teknologiaan perustuvien energiatehokkaampien laitteiden käyttöönoton myötä.

Valaistus

Sähköenergian käyttökohteena valaistuksen energiatehokkuuden voidaan nähdä koostuvan kolmesta tekijästä: valaistustapa ja valaisinsijoittelu, valaistuksen tarpeenmukainen käyttö ja ympäristö (Lehtonen et al. 2007). Kunkin tekijän energiatehokkuuden parantamiseksi on useita teknologisia mahdollisuuksia, joita on eritelty kuvassa 6.17.



Kuva 6.17. Energiatehokas valaistus (Kallasjoki 2006, Lehtonen et al. 2007 mukaan).

Tarkasteltaessa valaistuksen energiatehostumisen mahdollisuuksia aina vuosiin 2020 ja 2050 asti on syytä huomata, että eri vaihtoehtojen käyttöönottoon kuluva aika vaihtelee laajoissa rajoissa. Kuvan 6.17 mukaisessa jaottelussa valonlähteeseen ja valaisimeen liittyvät toimenpiteet ovat tyypillisesti nopeasti toteutettavissa, esimerkkinä lampun vaihto valotehokkaampaan malliin. Toista ääripäätä edustavat laajoja valaistusjärjestelmien uusimista vaativat vaihtoehdot (esim. luonnonvalon hyödyntäminen), jotka toteutuvat tyypillisesti rakennuskannan uusiutumiseen tai korjausrakentamiseen liittyvän suunnittelun kautta. Globaalisti on arvioitu, että uusien teknologioiden käyttöönoton myötä kotitalouksien valaistukseen kuluva energiamäärä voidaan vähentää viides- tai neljäsosaan verrattuna nykyisiin yleisiin hehkulamppu- ja halogeenivalaistusteknologioihin (IPCC 2007).

Suomen kotitalouksien valaistukseen käyttämästä sähköstä esitetty arvio, 1 617 GWh, perustuu vanhakkoon arvioon valonlähteiden jakaumasta (Korhonen et al. 2002), jonka mukaan suomalaisissa kotitalouksissa oli vuonna 2000 keskimäärin 23,5 valonlähdettä. Ne jakautuivat siten, että hehkulamppuja käytettiin 19:ssä, vakioloistelamppuja 3:ssä, halogeenilamppuja 0,5:ssä ja pienloistelamppuja 1 valonlähteessä.

Perinteiset hehkulamput ovat valotehokkuusmielessä nykyisin käytetyimmistä valaistusratkaisuista heikoimpia. Hehkulamput ovat lämpösäteilijöitä, joihin viedystä energiasta tyypillisesti vain n. 5 % muuttuu valoksi ja loppu lämmöksi. Hehkulamppujen valotehokkuus on tyypillisesti n. 10 lm/W. Koriste-, kohde- ja tehostusvalaisimina yleistyneet halogeenilamput ovat uudemman sukupolven hehkulamppuja, joihin viedystä energiasta noin 10 % muuttuu valoksi. 12 V:n jännitteellä toimivien halogeenilamppujen valotehokkuus on tyypillisesti noin 18 lm/W ja 230 V:n jännitteellä toimivien noin 15 lm/W. (Härkönen 2008)

Loistelamput ovat valotehokkuudeltaan noin 4–7 kertaisia hehkulamppuihin verrattuna (Korhonen et al. 2002). Loistelamput vaativat toimiakseen ns. virranrajoittimen, jonka kuluttama teho on lisättävä lampun käyttämään tehoon. Näin hehkulamppujen ja loistelamppujen energiatehokkuuksien ero ei ole yhtä suuri kuin valotehokkuuksien.

Pienloistelamppujen eli ns. energiansäästölamppujen (Compact Fluorescent Lamp, CFL) vaihtaminen hehkulamppujen tilalle on nopea tapa säästää energiaa, sillä kierrekantaiset pienloistelamput sopivat useisiin nykyisiin valaisimiin, ja niitä voidaan siksi suoraan vaihtaa hehkulamppujen tilalle. Energiansäästölamppujen tuotekirjo on monipuolistunut, ja niiden hinnat ovat laskeneet huomattavasti aivan viime vuosina. Energiainsäästölamput ovatkin yleistyneet nopeasti Suomessa. Vuonna 2007 suoritetussa kyselytutkimuksessa 20 % kotitalouksista vastasi, että väite ”kotitaloutemme yleisimmin käytetyissä valaisimissa on energiansäästölamput” kuvaa tilannetta hyvin (Rouhiainen 2008). Tämän perusteella kotitalouksien energiansäästölamppujen määrä lienee kasvanut vuoden 2000 arviosta (Korhonen et al. 2002).

Nykyisin saatavilla olevan teknologian avulla saavutettavissa olevasta Suomen kotitalouksien valaistuksen energiansäästöpotentiaalista vuoteen 2020 esitetään kolme erilaisiin tehostumisskenaarioihin perustuvaa karkeaa suuruusluokka-arviota lähteessä Gynther et al. (2007). Skenaariot perustuvat eri asteisiin nykyisin markkinoilla olevien energiatehokkaimpien lamppujen yleistymisiin ja hehkulamppujen osittaiseen korvaamiseen energiansäästölamppuilla. Laskelman oletuksilla saavutetaan skenaarioristasta riippuen 500:n, 1 100:n ja 1 400 GWh:n energiansäästö verrattuna arvioituun normaalikehitykseen, jonka mukaan kotitalouksien valaistukseen vuonna 2020 kuluisi 2 049 GWh sähköä. Arvioissa ei ole huomioitu valaistuksen lämmitysvaikutuksen vaikutusta energiansäästöön.

Uusi energiaa säästävä teknologia valaistuksessa, jonka kaupalliset sovellukset ovat vasta yleistymässä, on LEDeihin (Light Emitting Diode) perustuva valaistus. LED on puolijohdetekniikkaan perustuva loistediodi. Ns. valkoista valoa tuottava LED-valaistus mahdollistui, kun sininen tuottava LED onnistuttiin kehittämään vuonna 1993. Valkoista valoa tuottava LED mahdollistaa LED-teknologian soveltamisen yleisvalaistukseen ja perinteisten kotitalouksissa käytettävien valaistusratkaisujen korvaamisen.

LED-valaistuksen energiansäästöpotentiaali perustuu sekä LEDien pienen koon mahdollistamiin monipuolisiin sovelluksiin että teoreettisesti saavutettavissa olevaan nykyisiä teknologioita parempaan valotehokkuuteen. LEDien käyttöikä voi olla jopa yli 100 000 tuntia, joka vastaa yli kymmenen vuoden yhtäjaksoista käyttöä. LEDien valotehokkuus kuitenkin pienenee käytön myötä, joten varsinaisena hyötypolitoikänä käytetään yleisesti 50 000 tuntia (Härkönen 2008). Tänä päivänä käytössä olevat valkoista valoa tuottavat LED-yleisvalaisimet yltyvät n. 10–40 lm/W:n valaistustehokkuuteen (IEA 2006), joka on hehkulamppujen ja loistelamppujen välimaastossa. Uusimissa koekeluilissa olleilla teknologioilla on laboratorio-olosuhteissa lyhytaikaisesti päästy jo luokkaa 100–130 lm/W oleviin tehokkuuksiin. Teoreettisesti LEDeillä voidaan saavuttaa jopa valotehokkuus 400 lm/W. (Pakarinen 2004; Tuominen 2007; Nakamura 2007)

LEDien yleistymisen ongelmana kotitalouksien valaistuksessa on ollut se, että yleisvalaistuskäyttöön soveltuvat suuritehoiset LED-ratkaisut kuumenevat voimakkaasti. Tällöin LEDien käyttöikä laskee, joten niitä on jäähdytettävä. Ongelman nykyisillä teknologisilla ratkaisuilla ja nykyisillä LEDien valotehokkuuksilla LED-valaisimet eivät ole vielä energiatehokkuudeltaan loistelamppujen tasolla. Suomen oloissa LEDit ovatkin omimmillaan ulkovalaistuksessa, sillä niiden valovirta kasvaa lämpötilan laskiessa, ja alhainen ympäristön lämpötila vähentää jäähdytyksen tarvetta. Lisäksi LED -valaistusratkaisut ovat vielä kalliita muihin vaihtoehtoihin nähden. Voidaan perustellusti olettaa, että tulevaisuudessa LED-valaistusratkaisut ohittavat loistelamput, mutta siihen menee vielä vuosia. (Pakarinen 2004)

Vuoteen 2020 mennessä LEDien vaikutus kotitalouksien valaistuksessa lienee vielä kohtalaisen pieni – arviolta 10–20 % luokkaa. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat se, että teknologian kehittyminen kilpailukykyiseksi vie vielä aikaa ja se, että yleistyminen tapahtuu suurelta osin aikaa vievän korjaus- ja uudisrakentamisen yhteydessä valaistusjärjestelmien uusiutumisen kautta. Kokonaisuudessaan LEDien kehittämiseen suuntautuvat kiinnostus ja tuotekehityspanokset ovat niin suuria, että niihin perustuva teknologia voi hyvinkin olla merkittävin nykyään tunnetuista kotitalouksien valaistusteknologioista vuoteen 2050 mennessä. (Tetri 2008; Härkönen 2008)

Vuoteen 2050 mennessä esimerkiksi ns. orgaanisten ledien (OLEDien) kehitys voi kuitenkin mahdollistaa nykyteknologiaan verrattuna aivan uudenlaisia valaistusratkaisuja. OLEDien avulla kehitellään valaisevia kalvoja, joiden kehittyessä riittävästi eräänlainen ”valotapetointi” ja entistä suurempi integrointi esim. kalusteisiin mahdollistuisi. Tällöin erillisten valaisimien merkitys pienentyisi. (Tetri 2008)

Kylmälaitteet

Kotitalouksien kylmälaitteiden vuotuisesta sähkönkulutuksesta vuonna 2000 on esitetty arvio 2216 GWh (Korhonen et al. 2002), joka on suurin yksittäisen laiteryhmän kulutus. Luku sisältää kotitalouksien jääkaapit, pakastimet ja jääkaappi-pakastimet.

Uusien kylmälaitteiden energiatehokkuus on parantunut huomattavasti viime vuosikymmeninä. Esimerkiksi tänä päivänä myytävät kylmälaitteet kuluttavat jopa yli puolet vähemmän sähköä kuin 1970-luvulla valmistetut vastaavat laitteet (KTM 2001). Kylmälaitteiden laitekannan uusiutuessa niiden yhteenlasketun kulutuksen on ennustettu putuvan normaalissa kehityksessä tasolle 1710 GWh vuonna 2010. (Korhonen et al. 2002)

Kylmälaitteiden energiatehokkuuden parantuminen on yhä mahdollista. Listauksia kylmälaitteiden energiatehokkuutta parantavista teknologioista esitetään mm. lähteissä IEA (2006) ja Gynther et al. (2007). Näihin kuuluvat mm. erilaiset eristyksen parantamiseen

perustuvat ratkaisut, lauhduttimen ja lämmönvaihtopinta-alan kasvattaminen ja energia-
tehokkaampien sähkömoottorien sekä erilaisten ohjaus- ja säätöjärjestelmien hyödyntä-
minen.

Teknisesti on mahdollista rakentaa kylmälaitteita, joiden kulutus on tuoteryhmästä riip-
puen 33–41 % uusien laitteiden kulutuksesta vuonna 2004 (Gynther et al. 2007). Mikäli
koko Suomen vuoden 2010 arvioitu laitekanta (Korhonen et al. 2002) korvautuisi tällai-
silla laitteilla vuoteen 2020 mennessä, päästäisiin jopa 1200–1400 GWh:n säästöihin
arvioituun normaalikehitykseen verrattuna (Gynther et al. 2007).

Kulutuselektroniikka

Kotitalouksien kulutuselektroniikka -laiteryhmään kuuluvat mm. tietotekniikka, kuten
mikrotietokoneet ja sen oheislaitteet sekä erilaiset viihdelaitteet kuten televisiot, digi-
boksit, DVD-soittimet ja stereolaitteet. Ryhmän kulutukseksi vuonna 2000 arvioitiin
1080 GWh, ja sen arvioitiin kasvavan normaalikehityksessä yli 1 500 GWh:iin vuoteen
2010 mennessä (Korhonen et al. 2002).

Kulutuselektroniikkalaitteiden laitekanta on viime vuosina ollut kasvussa yleisen asun-
tojen varustelutason parantumisen ja monien uudenlaisten laitteiden markkinoille tulon
myötä (Rouhiainen 2008). Viime vuosina on ollut nähtävissä kehitys, jossa samaa laite-
ta voi käyttää yhä useampaan tarkoitukseen, joten perinteiset laitteiden rajapinnat ovat
hämärtyneet. Tulevaisuudessa tämä kehitys saattaa voimistua edelleen.

Pitkällä aikavälillä, aina vuonna 2050 käytössä olevien kulutuselektroniikkalaitteiden
käyttötarkoituksien ja ominaisuuksien hahmottaminen on erityisen haastavaa. Tähän
vaikuttavat laitteiden nopea uusiutuminen ja uusien teknologioiden kehittyminen ja lai-
teryhmän hajanaisuus. Esimerkiksi tiedonsiirto- ja tallennusteknologioiden ja
-kapasiteettien kehitys tuovat tulevaisuudessa aivan uudenlaisia mahdollisuuksia kulu-
tuselektroniikkalaitteiden kehitykseen. Perinteisten energiansäästötarkastelujen, joissa
oletetaan laiteryhmiä käyttötarkoitusten säilyminen nykyisen kaltaisina, ulottaminen
pitkälle tulevaisuuteen ei ole mielekästä kulutuselektroniikkalaitteiden kohdalla.

Sähkökulutukseltaan suurin yksittäinen kulutuselektroniikan laiteryhmä on ollut televi-
siot, jonka kulutukseksi vuonna 2000 arvioitiin 452 GWh (Korhonen et al. 2002). Kulu-
tus lienee kasvanut tästä, sillä viime vuosina yhä suuremmat ja enemmän energiaa ku-
luttavat taulutelevisiot ovat yleistyneet perinteisten kuvaputkitelevisioiden (CRT) kus-
tannuksella. Tämänhetkisten taulutelevisioiden tekniikka perustuu nestekide- (LCD) tai
plasmanäyttöön. Tyypillisiä suurten taulutelevisioiden tehonkulutusarvoja kuvaavat
keskimääräinen Euroopassa myytävien 42-tuumaisien plasmatelevisioiden käytönaikainen
teho, 312 W, ja 32-tuumaisien LCD-televisioiden vastaava luku, 153 W (EuP 2008).

Verrattaessa lukuja vuotta 2000 koskevaan arvioon Suomen televisioiden laitekannan keskimääräisestä tehonkulutuksesta, 90 W (Korhonen et al. 2002), teknologian muutoksen aiheuttama kasvava trendi laiteryhmän energiankulutukseen on ilmeinen.

Teollisuus on arvioinut, että taulutelevisioiden osuus uusista myytävistä televisioista kasvaa puoleen vuoteen 2008 mennessä (Gynther et al. 2007). Uusi, jo markkinoilla oleva teknologia on myös ns. projektiotelevisiot. Jo olemassa olevan teknologian mahdollistama energiatehokkuuden parantuminen (EuP 2008) voi kompensoida televisioiden sähkönkulutuksen kasvua pidemmällä aikavälillä. Tulossa olevien uudenlaisten energiantarvetta lisäävien televisiopalvelujen, kuten ns. teräväpiirtokuvan, tuottaminen (IEA 2006), aiheuttaa lisähaasteita televisioiden energiankulutuksen pienentämiseksi teknologian keinoin.

Viimeaikainen erityistekijä televisioihin liittyvässä sähkönkulutuksessa on ollut digiboksien käyttöönotto vuosina 2007–2008 tapahtuneen analogisten televisiolähetysten lakkauttamisen vuoksi. Karkealla laskelmalla on esitetty, että digiboksien yhteenlaskettu vuosikulutus voisi enimmillään olla noin 380 GWh (Motiva 2007).

Mikrotietokoneet ovat yleistyneet kotitalouksissa viime vuosina huomattavasti. Vuonna 2006 64 %:lla kotitalouksista oli käytössään mikrotietokone, kun vastaava luku vuonna 1998 oli 30 % (Tilastokeskus 2006b). Laitekannan kasvu näkyy myös sähkönkulutuksessa. Kotitalouksien mikrotietokoneiden kulutukseksi vuonna 2005 arvioitiin karkeasti 460 GWh (Motiva/Heikki Härkönen 2005, Gynther et al. 2007 mukaan), kun vuotta 2000 koskeva arvio on 116 GWh (Korhonen et al. 2002). Kannettavat tietokoneet ovat yleisesti huomattavasti energiatehokkaampia kuin vastaavilla ominaisuuksilla varustetut pöytätietokoneet. Keskitason ominaisuuksilla varustettu kannettava kuluttaa tyypillisesti 50–80 % vähemmän energiaa kuin vastaava pöytäkone (Energy Star 2008).

Suurin osa kulutuselektronikkalaitteista kuluttaa varsinaisen käytön lisäksi sähköä ollessaan valmiustilassa (stand-by-tila). Tämä ns. lepovirrankulutus muodostaa merkittävän osan laitteiden kokonaiskulutuksesta. Suomen kotitalouksien nykyisen kulutuselektronikkalaitteiden yhteenlasketun lepovirtakulutuksen on karkeasti arvioitu voivan olla nykyisellään jopa noin 1000 GWh:n luokkaa (Gynther et al. 2007; KTM 2001).

Kulutuselektronikkalaitteiden lepovirrankulutuksessa voidaan teknologian avulla säästää huomattavat säästöt. Jo nykyinen teknologia mahdollistaa säästöjä. Esimerkiksi markkinoilla olevien energiatehokkaimpien televisioiden lepovirrankulutus on luokkaa 0,1 W, kun arvio laitekannan keskimääräisestä lepovirrankulutuksesta vuonna 2010 on 4,5 W (Korhonen et al. 2002). Pitkällä aikavälillä säästöpotentiaalia kuvaa se, että useissa tuoteryhmissä on teknisesti mahdollista päästä luokkaa 0,1 W:n luokkaa oleviin stand-by-tehoihin, kun nykyisin tyypilliset tehot liikkuvat muutamissa wateissa (Korhonen et

al. 2002; EuP 2008). Stand-by-kulutuksen tekninen säästöpotentiaali on näin ollen varovaisestikin arvioiden useita kymmeniä prosentteja kotitalouksien kulutuselektroniikkalaitteiden sähkökulutuksesta.

Muista laiteryhmistä

Kotitalouksien ruuankypsennyslaitteiksi luetaan tässä liedet ja mikroaaltouunit, joista mikroaaltouunien kulutus on ollut kymmenesosan luokkaa koko laiteryhmän kulutuksesta. Liesien komponenteiksi erotetaan uuni ja keittotasot. Sähköuunien energiatehokkuutta parantavia teknologisia suunnitteluvaihtoehtoja on lueteltu yksityiskohtaisesti lähteessä Korhonen et al. (2002). Yleensä kirjallisuudessa uunien eri säästömahdollisuuksien säästövaikutuksiksi on arvioitu 1–20 % ja kokonaissäästömahdollisuuksiksi 27–54 % vuoden 2000 tasosta ratkaisujen taloudellisuudesta riippuen. Keittotason osalta induktiokuumentamista on pidetty merkittävimpänä energiaa säästävänä teknologiana. Kulutus on luokkaa 20 % pienempi kuin valurautalevyillä. Keraamisilla keittotasoilla kulutus on n. 10–15 % pienempi. (Korhonen et al. 2002)

Sähkösauna on Suomen oloissa merkittävä kotitaloussähköä kuluttava laiteryhmä, mutta tutkimuksia teknologian mahdollistamasta energiansäästöstä tässä käyttökohteessa on niukasti saatavilla.

Energiatehokkaimman teknisesti mahdollisen pyykinpesukoneen energiankulutukseksi on arvioitu ohjelmaa kohti 0,16–0,17 kWh/kg (Korhonen et al. 2002; EuP 2008). Vuoden 2007 arvioitua Suomen pesukonekannan keskimääräiseen yhden pesukoneen kulutukseen 227 kWh/vuosi (Korhonen et al. 2002) verrattuna voitaisiin saavuttaa noin 15 %:n energiansäästö, mikäli koko kanta korvautuisi energiatehokkaimmilla mahdollisilla pyykinpesukoneilla

IEA (2006) arvioi, että uusien astianpesukoneiden energiatehokkuus on saavuttamassa teknologiset rajansa. Eurooppalaisten OECD:n jäsenvaltioiden alueella ennustetaan uusien astianpesukoneiden energiankulutuksessa noin 3,1 %:n vuosittaista tehostumista vuosina 2005–2010 jonka jälkeen vuosittainen tehostuminen hidastuu noin 0,5 %:iin. Astianpesukoneiden nykyinen arvioitu Suomen laitekannan (v. 2007) vuosittainen yksikkökulutus, 236 kWh, putoaisi 133 kWh:iin (44 %), mikäli kanta korvautuisi energiamerkinnältään A-luokan malleilla (Korhonen et al. 2002). Astianpesukoneen omistavien kotitalouksien osuus on ollut kasvussa kaikissa kotitaloustyypeissä (Tilastokeskus 2006b), mikä hidastaa laiteryhmän energiatehokkuuden parantumisella saavutettavaa energiansäästöä.

6.3.2 Palvelut

Palvelusektori on hyvin hajanainen, ja sen sähkönkulutus muodostuu moninaisiin eri käyttötarkoituksiin tarkoitettujen laitteiden kulutuksesta. Palvelusektoriin kuuluvia alatoimialoja ovat hotelli- ja ravintola-ala, terveydenhuolto- ja sosiaalipalvelut, koulutus, muut julkiset palvelut, toimistot ja hallinto sekä kauppa. Sähkönkulutukseltaan merkittävimmiksi alatoimialoiksi on arvioitu toimistot ja kauppa (Pohjolainen 2000).

Palvelujen laitesähkön ja valaistuksen energiankulutus vuonna 2005 oli 14 656 GWh, joten sektorin energiankulutus on kokonaisuudessaan merkittävämpi kuin kotitalous-sähkön energiankulutus. Kasvu vuodesta 2000 oli yli 17 % (Tilastokeskus 2006a), eli palvelujen sähkönkulutus on kasvanut nopeammin kuin kotitalouksien. Kansantalouksien kehittämisessä on tyypillistä, että palvelusektorin osuus kasvaa yleisen elintason kasvun myötä. Tämä voi näkyä myös sektorin energiankulutuksessa.

Kattavaa tutkimusta palveluiden sähkönkäytön jakautumisesta Suomessa ei ole tehty. Yksittäisten tutkimusten perusteella merkittäviksi sähkönkäyttöryhmiksi on Suomen palvelusektorilla arvioitu ainakin:

- Sähkömoottorit, 5 000 GWh, arvio koskee vuotta 2004 (Electrowatt-Ekono (2005) Gynther et al. (2007) mukaan))
- Palvelujen valaistus, 4 000 GWh (Suomen sähkötukkuliikkeiden liitto et al. 2008)
- Tie- ja katuvalaistus, 900 GWh (Suomen sähkötukkuliikkeiden liitto et al. 2008)
- Toimistojen sähkölaitteiden kulutus, 719 GWh, arvio koskee vuotta 2000 (Korhonen et al. 2002). Toimistojen tietokoneiden kulutukseksi on arvioitu 690 GWh (Motiva (2006) Gynther et al. (2007) mukaan).

Sähkömoottorit ovat osa useimpia sähkölaitteita. Palvelusektorilla merkittäviä sähköä kuluttavia laiteryhmiä, joiden osana sähkömoottorit toimivat, ovat esimerkiksi kylmälaitteet, kuljettimet ja rullaportaat (KTM 2001). Sähkömoottoreiden sähkönkulutusta voidaan vähentää mm. siirtymällä tehokkaampien moottorien käyttöön, lisäämällä taajuusmuuttajakäyttöä ja mitoittamalla moottorit kuorman suhteen oikein. Eurooppalaisten selvitysten mukaan taajuusmuuttajia käyttämällä on mahdollista saavuttaa 15–35 %:n energiansäästö sovelluskohteesta riippuen (Gynther et al. 2007). Koko Euroopan palvelusektorin säästömahdollisuuksia energiatehokkaampien moottorien ja taajuusmuuttajien avulla on käsitelty lähteessä de Almeida et al. (2003), jonka mukaan Euroopan palvelusektorilla voitaisiin saavuttaa teknisesti 14,3 %:n ja vain kustannustehokkaita toimia toteuttamalla 9,2 %:n energiansäästö arvioituun normaalikehitykseen verrattuna vuoteen 2015 mennessä.

Erityisesti kaupan alalla yleiset kylmälaitteet ovat palvelusektorilla merkittävästi sähköä kuluttava laiteryhmä. Suomessa ne kuluttavat karkeasti arvioituna noin puolet kaupan alan sähkönkulutuksesta (Gynther et al. 2007). Sen lisäksi, että kasvihuonekaasupäästöjä aiheutuu palvelusektorin kylmälaitteiden sähkönkulutuksen kautta, merkittävä päästölähde sektorilla ovat laajoissa jäähdytysjärjestelmissä jäähdytysaineina käytettyjen fluorihiilivetyjen (HFC) vuodot (IPCC 2007). Jäähdytysaineiden päästöjen vaikutus voi kokonaisuudessaan olla merkittävämpi kuin palvelusektorin kylmälaitteiden energiankulutuksen kautta tapahtuva vaikutus (IPCC 2007).

Palvelujen, erityisesti toimistojen, valaistuksessa käytetään yleisesti loistelamppuvalaistusta. Uusissa toimistotiloissa valaistustarpeena pidetään 10 W/m^2 , ja jopa 5 W/m^2 :n taso pidetään nykyteknologiallakin mahdollisena, kun nykyinen keskiarvo on jopa 25 W/m^2 (Korhonen et al. 2002). Valaistusteknologioiden kehitystä on käsitelty kotitalouksien valaistuksen yhteydessä. Merkittävä osa palvelusektorin säästöpotentiaalista sisältyy valaistuksen ohjaus- ja säätöjärjestelmien sekä paremmin päivänvaloa hyödyntävien järjestelmien yleistymiseen.

Lyhyen aikavälin keinona erityisesti palvelujen valaistuksen energiatehostamiseksi on mainittu elektronisten liitäntälaitteiden hyödyntäminen loistelamppuvalaisimissa. Niiden energiansäästö verrattuna perinteisiin ratkaisuihin on noin 20–25 %, ja niiden asentaminen on taloudellisesti kannattavaa erityisesti, kun vuotuinen käyttöaika on pitkä. (KTM 2001)

Nykyteknologian mahdollistamaksi palvelujen valaistuksen vuosittaisen säästöpotentiaalın suuruusluokaksi on arvioitu karkeasti 1 200 GWh (30 % palvelujen valaistuksen kulutuksesta) ja katuvalaistuksen 200 GWh (22 % katuvalaistuksen kulutuksesta) (Suomen sähkötukuliikkeiden liitto et al. 2008).

6.3.3 Johtopäätöksiä

Kotitalouksien ja palveluiden sähkölaitteiden ja valaistuksen laiteryhvät ovat hajanaisia, ja niiden energiatehokkuuden parantaminen koostuu hyvin laajasta joukosta teknologisia toimenpiteitä. Tämän vuoksi yhtenäisten visioiden esittäminen pitkälle tulevaisuuteen on haastavaa, ja tutkimustietoa aiheesta on niukasti. Useista laiteryhmistä onkin esitetty ainoastaan nykyään parhaan saatavilla olevan teknologian teknisiä energiansäästämismahdollisuuksia. Tarkastelujen ulottaminen aina vuoteen 2050 tarkoittaa, että nykyinen laitekanta ehtii uusiutua moneen kertaan, mikä mahdollistaa laajamittaisen energiatehokkaamman teknologian käyttöönoton. Poikkeuksena ovat laajat valaistusjärjestelmien uusimiset, jotka tapahtuvat tyypillisesti uudis- ja korjausrakentamisen yhteydessä, joten niiden energiaa säästävä vaikutus on hitaampi.

Kotitalouksien nykyisen sähkönkulutusjakauman ja energiateknologian tulevaisuuden näkymien perusteella kolme tarkemmin tarkasteltua laiteryhmää ovat kylmälaitteet, valaistus ja kulutuselektronikka. Kylmälaitteiden energiatehokkuuden parantuminen on ollut nopeaa, ja teknisesti parantuminen on yhä mahdollista. Kotitalouksien kulutuselektronikkalaitteiden laitekanta ja tuotekirjo ovat olleet kasvussa. Kulutuselektronikkalaitteiden nopea uusiutuminen ja kehitys aiheuttaa pitkän aikavälin arviointiin epävarmuutta. Merkittävin yksittäinen parannusalue on lepovirta- eli stand-by-kulutuksen pienentämiseen liittyvä potentiaali.

Kotitalouksien valaistuksessa on nähtävissä suuri yksittäinen teknologiamurros LED-tekniikkaan perustuvien valaistusratkaisujen myötä. LEDit eivät ehdi vaikuttaa kovin merkittävästi vuoteen 2020 mennessä, mutta vuonna 2050 ne voivat olla jo merkittävin yksittäinen valaistustekniikka. Lyhyemmällä aikavälillä energiansäästölamppujen yleistymisen mahdollistaa merkittäviä säästöjä. Energiansäästölamput ovat kuitenkin jo nykyään melko yleisiä, joten säästöpotentiaalista on jo valjastettu merkittävä osa.

Palvelujen sähkölaitteista suuren ryhmän muodostavat eri laitteiden osana käytettävät sähkömoottorit, joihin liittyviä merkittäviä yksittäisiä energiansäästökeinoja ovat taa-juusmuuttajien ja tehokkaampien moottorien käytöt. Valaistus on toinen palvelujen merkittävistä sähkönkäyttökohteista, jossa teknologian avulla on saavutettavissa merkittäviä energiansäästöjä.

Tätä selvitystä varten suoritettiin laskelmia, joissa arvioitiin karkeasti energiatehokkaan teknologian käyttöönoton teknisiä mahdollisuuksia sähköenergian säästämiseksi kotitalous- ja palvelusektoreiden sähkölaitteiden ja valaistuksen energiankulutuksessa. Kotitalouksien osalta laskelmissa huomioitiin arvioita nykyisten sähkölaitteiden laitekannoista (Rouhiainen 2008; Tilastokeskus 2006b; Korhonen et al. 2002), TEM:n baseline-skenaariota mukaisia arvioita laitekantojen ja kotitalouksien lukumäärän kehityksestä ja tässä kappaleessa esiteltyjä arvioita energiatehokkaimpien laitteiden kulutuksesta ja säästömahdollisuuksista (esim. Korhonen et al. 2002, EuP 2008; Suomen sähköttökuliikkeiden liitto et al. 2008). Etenkin palvelusektorin laskelma on hyvin karkea lähtötietojen puutteellisuuden takia, ja lukuarvoja tulee pitää vain suuntaa antavina. Laskelmien tuloksena saatiin kotitaloussektorilla arvio teknisesti mahdollisesta 23 %:n säästöstä ja palvelusektorilla luokkaa 15–20 %:n säästömahdollisuudesta verrattuna arvioituun normaalikehitykseen vuoteen 2020 mennessä. Näissä laskelmissa ei ole huomioitu säästökeinojen taloudellisuutta.

Energiatehokkaiden laitteiden yleistymistä hidastaa se, että kuluttajat eivät yleensä kiinnitä huomiota laitteiden energiatehokkuuteen ostopäätöksiä tehdessään (IEA 2006), vaan hankintahinta, joka on energiatehottomammilla laitteilla yleensä edullisempi, on määräävämpi tekijä. Merkittävä este on myös kannustinten puute. Esimerkiksi valaistus-

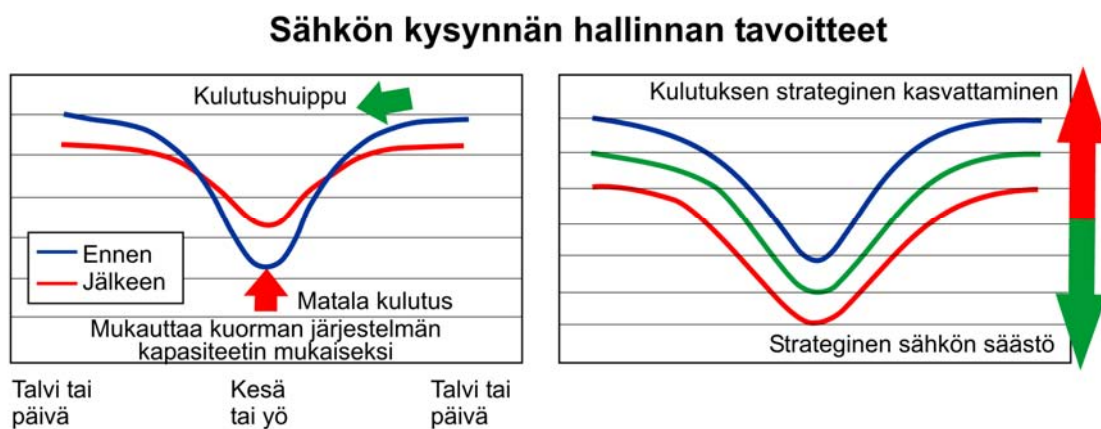
suunnittelijoilla ei välttämättä ole kannustinta ottaa energiatehokkuutta huomioon suunnittelussa ja laitevalinnoissa (Gynther et al. 2007).

Laitteiden energiatehokkuuden parantamiseksi kansainvälisesti yleisesti käytettyjä ohjauskeinoja ovat vapaaehtoiset sopimukset laitevalmistajien kanssa, energiatehokkuuden vähimmäisstandardit ja energiamerkinnot. Energiamerkintöjen ja energiatehokkuusstandardien on arvioitu vaikuttaneen merkittävästi mm. kylmälaitteiden energiatehokkuuden parantumiseen. Koska sähkölaitteet ovat maailman- ja Euroopan markkinoilla myytäviä tuotteita, ohjauskeinoja sovelletaan yleensä EU:n laajuisesti kaupan esteiden välttämiseksi. Kansallisen vaikuttamisen keinona on tiedottaminen. (Gynther et al. 2007)

Julkisella sektorilla käytettävien laitteiden energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa julkisten hankintojen ohjeistuksen kautta. Eräs mahdollinen markkinapohjainen ohjauskeino on muutamissa Euroopan maissa käytössä oleva ns. valkoisten sertifikaattien järjestelmä, josta on esitetty lisätietoja esim. lähteessä (Euro White Cert Project 2008).

6.4 Sähkön kysynnän hallinta (DSM, Demand Side Management)

6.4.1 Kysynnän hallinnan tavoitteet



Kuva 6.18. Sähkön kysynnän hallinnan tavoitteet. Kysynnän hallinnan vaikutuksesta kulutushuiput tasoittuvat. (VTT 2007)

Sähkön kysynnän hallinnalla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla vaikutetaan sähkön kysynnän ajalliseen vaihteluun tai sen tasoon: useimmiten tavoitteena on kulutusvaihtelujen tasoittaminen erityisesti sähkön huippukulutuksen aikana. Sähkön kysynnän hallintaa voidaan hyödyntää mm. seuraavilla tavoilla:

- Kulutushuippujen pienentämisen kautta voidaan vähentää huippukulutuskapasiteetin rakentamisen tarvetta ja sen käyttöä.
- Pois kytkettäviä kuormia voidaan käyttää kantaverkkotason häiriötilanteiden hallintaan sekä verkko- että voimalaitoshäiriöiden aikana.
- Pienentämällä kulutusta sähkön korkeiden hintojen aikana (jolloin myös tuotantokustannukset ovat korkeat) voidaan pienentää hintapiikkejä ja alentaa sähkönkäyttäjien sähkönhankintakustannuksia.
- Kysynnän hallintaa voidaan käyttää myös ohjaamattoman hajautetun tuotannon (tuuli, aurinko ym.) vaihtelujen kompensointiin.
- Kysynnän hallinnalla voidaan myös saavuttaa energiansäästöä ja pienentää kasvihuonekaasuja energiantuotannossa erityisesti kysyntähuippujen aikana.

6.4.2 Kysynnän hallinnan keinot

Sähkön kysynnän hallintaa voidaan toteuttaa osin erilaisilla säädöksillä ja määräyksillä mm. energiansäästön edistämiseksi. Pääosin keinot kuitenkin ovat markkinaehtoisia, jolloin sähkön käyttäjät saavat osansa niistä hyödyistä, jotka ne saavat aikaan osallistumalla kysynnän hallintaan. Tällaisia keinoja ovat mm.

- sähköpörssien ja säätösähkömarkkinoiden tuotteita kehittämällä siten, että joustavia kuormia voidaan tarjota entistä joustavammin
- käyttämällä markkinaehtoisia sopimuksia häiriötilanteiden hallinnassa
- kehittämällä uusia innovatiivisia tapoja joustavien kuormien myymiseksi takaisin markkinoille ja niihin liittyviä sopimus pohjaisia kuormien ohjauksia
- kehittämällä innovatiivista ja läpinäkyvää hinnoittelua loppuasiakkaille siten, että sähkönkäyttäjät saavat välitöntä hyötyä reagoinnistaan sähkön hintoihin
- kehittämällä uusia liiketoimintoja aggregaattoreille, jotka käyvät kauppaa joustavilla kuormilla ja hajautetulla tuotannolla (virtual power plants)
- kehittämällä kuluttajainformaatio/palautetietojärjestelmiä sähkön käytöstä, kustannuksista ja käytön ympäristövaikutuksista.

6.4.3 Kysynnän hallinnan teknologiat

Kysynnän hallinnan toteuttaminen vaatii erilaisten teknologioiden kehittämistä ja soveltamista. Näiden teknologioiden kustannusarviot DSM:n yhteydessä eivät ole yksikäsit-

teisiä, sillä teknologiat kehittyvät ja ne otetaan käyttöön pääosin muista syistä kuin DSM:n takia, mutta osa hyödyistä tulee myös DSM:n kautta. Tämän vuoksi seuraavassa on esitetty vain kvalitatiivisia arvioita kysynnän hallintaan liittyvien teknologioiden kehittämisestä vuoteen 2050 mennessä. Tekniikoista on käsitelty lähinnä niitä, jotka vaikuttavat sähkön kulutuksen ajallisen käyttäytymisen hallintaan, varsinaiset energiansäästötekniikat on käsitelty tämän selvityksen muissa osioissa.

Energian reaaliaikainen mittaus (vähintään tuntitasolla) on välttämätön edellytys DSM:n tehokkaalle toteutukselle. Tämä ei tule olemaan este DSM:lle: 1. sukupolven AMR-järjestelmät (automaattisen mittariluvun järjestelmät) tulevat käytännössä käyttöön kaikille energiankäyttäjille jo 2010-luvulla. Vuoden 2050 tienoilla on käytössä jo 3. tai 4. sukupolven älymittarit, jotka mahdollistavat tarkan kulutusmittauksen, reaaliaikaisen palautetiedon sähkönkäyttäjille, sähkömarkkinaliitännän mm. hintatietojen siirtämiseen sähkönkäyttäjän järjestelmiin sekä kuormien ohjausmahdollisuuden myös ulkopuolisten toimijoiden osalta.

Sähkön käyttäjien reagointi hintoihin ja ohjaustarpeisiin täytyy tapahtua automaattisesti. Tämä edellyttää **rakennus-, prosessi- ja kotiautomaation** kehittymistä ja integrointia kysynnän hallintaan ja energian säästöön. Voidaan olettaa, että suurella osalla sähkönkäyttäjistä on tarvittavat järjestelmät vuoteen 2050 mennessä.

Häiriötilanteiden hallinta edellyttää sähkökuormien nopeaa reagointia kriittisissä tilanteissa. Tämä voidaan toteuttaa **ei-kriittisten kuormien kauko-ohjauksella** ja sillä, että tietyt **kuormat reagoivat automaattisesti taajuuteen** sen laskiessa häiriötilanteissa. Tähän liittyvä tekniikka lienee käytössä tarpeellisessa määrin v. 2050.

Joustavien kuormien aggregointi ja virtuaalivoimalaitoskonseptit edellyttävät tarvittavan **ICT-teknologian ja niihin liittyvien hallintajärjestelmien** kehittämistä. Tämä liittyy osin ns. älykkäiden sähköverkkojen (smartgrid-tekniikat) kehittämiseen. Näiden kehittäminen ja laajamittainen soveltaminen liittyy pitkälti myös laajamittaisen hajautetun tuotannon kehittämiseen, mikä EU:n nykyisten tavoitteiden valossa näyttää todennäköiseltä, ja tarvittava teknologia lienee käytössä myös Suomen sähköverkoissa v. 2050.

Edellisen perusteella näyttää hyvin todennäköiseltä, että DSM:n toteuttamiseen tarvittava teknologia on olemassa vuoteen 2050 mennessä. DSM:n tarve on kuitenkin todennäköisesti kasvamassa toisaalta sähkön suurtuotannon (ydinvoima) kasvamisen takia (häiriötilanteet) ja toisaalta vaikeasti ohjattavan pientuotannon kasvamisen vuoksi. Ohjattavat sähkökuormat yksinään eivät välttämättä riitä peittämään kasvavaa ohjaustarvetta mm. siksi että ei-kriittisten sähkökuormien määrä ei välttämättä kasva. Näin ollen DSM:n toteuttamiseen tarvitaan uusia teknologioita.

Energiavarastot tulevat olemaan merkittävässä asemassa sähkön kulutus- ja tuotantovaihtelujen tasaamisessa. DSM:n kannalta sekä lämpövarastot että sähköenergiaa suoraan tai välillisesti varastoivat teknologiat ovat käyttökelpoisia.

- **Lämmön/kylmän** varastoinnilla voidaan tasoittaa sekä CHP-tuotantoon liittyvää sähköntuotannon vaihtelua että sähköllä tapahtuvan veden, tilojen lämmityksen ja jäädytyksen vaihteluja. Teknologia on pitkälti olemassa (kuten lämminvesivaraajat), vaikka uusiakin teknologioita on kehitteillä. Niiden käyttöön-otto riippuu pitkälti mm. sähkön tulevasta hinnoittelusta ja sitä kautta varastoinnista saatavasta hyödystä.
- **Sähköön liittyvät varastointitekniikat** sisältävät suuren määrän erilaisia teknologioita lähtien keskitetyistä varastoista (vesivarastot, CAES (Compressed Air Energy Storage), SMES (Superconductive Magnetic Energy Storage)) erilaisiin hajautettuihin energiavarastoihin (kuten erityyppiset akkuratkaisut, superkondensaattorit tai vauhtipyörät). Monet näistä teknologioista ovat vielä kehitysasteella, ja niiden soveltaminen Suomen energiajärjestelmissä v. 2050 on yhä epävarmaa.

Sähkö- ja hybridiautoratkaisut ovat mielenkiintoinen mahdollisuus DSM:n toteuttamiseen tulevaisuudessa. Näitä on osin käsitelty aiemmin liikenteen energiankäytön yhteydessä. DSM:n kannalta sähkö- ja hybridiautojen älykkäällä lataamisella voidaan tasoittaa sähkön kulutusvaihteluja, mutta ne muodostavat myös potentiaalisen resurssin huippukulutuksen leikkaamiseen, mikäli ne myös syöttävät tarvittaessa varastoitua energiaa verkkoon. Tällöin sähkö- ja hybridiautot muodostavat huomattavan energiavarastopotentialin.

6.4.4 DSM:n vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin

DSM:n vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin on kokonaisuudessaan vaikea arvioida kvantitatiivisesti. Seuraavassa on joitakin karkeita arvioita:

- DSM:n avulla voitaneen pienentää sähkön huipputehoa luokkaa 5 % (500–1 000 MW aikajänteestä riippuen), jolloin huipputuotantokapasiteetti pienenee vastavasti ja samalla myös verkostoinvestoinnit pienenevät: näillä on välillinen vaikutus kasvihuonepäästöihin.
- Huippuenergian (kaasuturbiinit) energian korvaaminen DSM:llä pienentää suoraan niiden tuottamia kasvihuonekaasuja (ehkä luokkaa 500 MW x 50 h = 25 GWh/a).

- Kulutusvaihtelujen pieneneminen johtaa fossiilisten voimalaitosten tuotannon säädön pienenemiseen (kvantitatiivinen arvio vaikeaa).
- Ei-säädettävän tuotannon (tuuli, aurinko, ym.) vaihtelujen kompensointi DSM:n avulla keskitetyn tuotannon säädön sijasta pienentää kasvihuonepäästöjä (vaikutus lienee pitkällä tähtäimellä merkittävä, mutta kvantitatiivinen arvio vaikeaa).
- DSM:n toteuttaminen energiavarastoilla lisää energiankulutusta varastojen energiahäviöiden osalta; nämä ovat tyypillisesti kymmenien prosenttien luokkaa. Vaikutukset kasvihuonekaasuihin ovat epämääräisiä, koska varastoja ladataan tyypillisesti vähäpäästöisemmällä sähköllä ja niitä puretaan korvaamaan suu-rempiä päästöistä sähköntuotantoa.
- Arviot DSM:n vaikutuksesta energian säästöön ja sitä kautta kasvihuonekaasuihin vaihtelevat, vaikutukset voivat olla luokkaa 5–10 % kotitalouksien ja rakennusten sähkön käytössä (automaatio, hinnoittelu, palautetieto).

6.5 Yhdyskuntasuunnittelu

6.5.1 Yhdyskuntasuunnittelun mahdollisuudet ja tavoitteet

Kasvihuonekaasupäästöjen määrään voidaan vaikuttaa yhdyskuntasuunnittelun avulla seuraavilla päätavoilla:

1. rakentamisen *sijoittumisella* suhteessa muuhun rakennuskantaan
2. rakentamisen *aluetehokkuuden* valinnalla
3. käytettävien *talo- ja korttelityyppien* valinnalla
4. *yhdyskuntateknisten järjestelmien* valinnalla
5. *rakentamistapaan* vaikuttavilla kaavamääräyksillä ja -merkinnöillä sekä tontinluovutusehdoilla.

Useimmiten suunnittelun aikana tehtävät valinnat ovat erillisiä valintoja vain näennäisesti. Yhdyskuntasuunnittelussa vasta kokonaisuus (esimerkiksi tietyn asuinalueen kaava) lukitsee em. valinnat omalle tasolleen. Sitä ennen valintojen vaikutuksia tarkastellaan suhteessa kokonaisuuteen. *Sijaintipäätöksillä* vaikutetaan etäisyyksiin toimintojen välillä ja rakentamisen suhteeseen luonnonympäristöön (maaperä-, vesi- ja ilmasto-olosuhteisiin). Etäisyyksillä on suuri merkitys toimintojen välisten liikenne- ja teknisten järjestelmien laajuuden kannalta ja niiden käyttöön liittyvien energiakustannusten ja vastaavien päästöjen kannalta. Rakentamisen suhteella ympäröiviin luonnonolosuhteisiin voidaan puolestaan vaikuttaa siihen, kuinka paljon energiaa tarvitaan

tiettyjen epäedullisten olosuhteiden (huonon maaperän, kylmien lämpötilojen, tuulien tms.) muuttamiseksi asuinympäristölle kelvollisiksi. *Aluetehokkuus* (rakennettu kerosala maa-alaa kohti) vaikuttaa paitsi keskimääräisiin etäisyyksiin myös siihen, kuinka laajalta alueelta julkisten tai yksityisten palvelujen asiakaspohja on kerättävä. Tiheä asutus ja korkea rakennustehokkuus mahdollistavat useampia ja korkeatasoisempia palveluita (joukkoliikenne, kaukolämpö, koulut, kaupungat jne.) kuin harva asutus ja alhainen rakennustehokkuus. Samalla etäisyydet lyhenevät ja infrastruktuurin rakentamiseen ja ylläpitoon sekä liikkumiseen tarvittavat kustannukset, energian määrä ja päästöt alenevat.

Yhdyskuntien suunnittelua ohjataan Suomessa kolmella tasolla:

- 1) Valtakunnan tasolla tärkein ohjausinstrumentti on valtakunnalliset alueidenkäytön tavoitteet (VAT), joita ympäristöministeriö päivittää vajaan 10 vuoden välein. Asiakirja on pääosin sanallinen eikä sisällä maankäyttöä sitovasti ohjaavia alueidenkäyttösuunnitelmia. VAT:n määrittelemiä tavoitteita on kuitenkin pidettävä ohjeena alemman tasoissa alueidenkäytön suunnitelmissa.
- 2) Maakuntien ja seudullisen tason tärkeimmät ohjausinstrumentit ovat maakuntaliittojen laatimat maakuntasuunnitelmat ja -kaavat. Lisäksi varsinkin isojen kaupunkien ja kaupunkiseutujen naapurikunnat laativat yhteistyönä tapauskohtaisesti esimerkiksi maankäytön, asumisen ja liikenteen (MAL) kehittämissuunnitelmia tai erityisiä maankäytön kehityskuvia, jotka ovat yleispiirteisiä strategisen tason ohjausvälineitä. Pääkaupunkiseudulla on erityinen lakisääteinen yhteistyöelin Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV), joka vastaa neljän kunnan alueella lähinnä joukkoliikenteen ja jätehuollon suunnitelmista ja toteutuksesta.
- 3) Kunnan tasolla tärkeimmät ohjausinstrumentit ovat koko kuntaa koskevat yleiskaavat, osa-alueita koskevat osayleis- ja asemakaavat. Yleiskaavoja on laadittu myös naapurikuntien yhteistyönä, kuten esimerkiksi Oulun kaupunkiseudulla. Yleiskaavat ohjaavat alemman tasoista asemakaavoitusta ja ovat ratkaisevia nimenomaan toimintojen ja mm. yritysten toimitilojen sijoittumispäätösten ja maanhankinnan kannalta. Sijaintipäätöksillä on puolestaan ratkaiseva vaikutus siihen, millaiseksi yhdyskunnan sisällä syntyvä liikenne (työ- ja asiointimatkat sekä tavaraliikenne) muodostuu. Yleiskaavassa otetaan yleensä myös kantaa rakentamisen tehokkuuteen, jolla on ratkaiseva vaikutus sekä teknisen että sosiaalisen infrastruktuurin rakentamispäätöksiin. Vahvistetut asemakaavat ovat yksityiskohtaisia oikeusvaikutteisia maankäytön suunnitelmia, joissa määritellään mitä, miten ja kuinka paljon saa millekin, tarkasti rajatulle alueelle rakentaa. Vasta asemakaavan perusteella voidaan myöntää rakennusluvut ja tehdä lopulliset sijaintipäätökset (lukuun ottamatta poikkeuslupamenettelyn piirissä olevia tapauksia).

Valtakunnallisella ja seudullisella tasolla tehtävillä maankäyttöä ja liikennejärjestelmiä koskevilla suunnitelmissa pyritään ohjaamaan *aluerakennetta* eli sitä, miten yhdyskuntien keskinäissuhteet (koot, erityisroolit, kehittymisnopeudet jne.) ja niiden väliset yhteysverkot (rata- ja tieverkot) tulevaisuudessa kehittyvät. Aluerakenteen kehittämisessä yleinen seudun taloudellinen kehitys ja alueelle tyypillisten teollisuus- ym. tuotannollisten toimialojen kehitys ovat nykyisin ratkaisevampia kuin tehdyt alueidenkäyttösuunnitelmat, jotka pikemminkin luovat edellytyksiä ja määrittelevät mahdollisuuksia. Aluerakenteen muutosta voidaan mitata esim. kaupunkien koon kasvulla, asutuksen painopisteen siirtymisenä, keskimääräisten asumistiheyksien tai työmatkaetäisyyksien muutoksina. Suomessa kaupungistuminen jatkuu edelleen melko voimakkaana, ja väestön painopiste siirtyy kohti suuria kaupunkeja. Vuosien 1970 ja 1992 välillä väestön painopiste siirtyi keskimäärin 500 m vuodessa etelään (Halme et al. 1996). Kaupunkien ja muiden yhdyskuntien alueellinen laajeneminen on samalla merkinnyt aluetehokkuuden ja asukastiheyden laskua. Tämä johtuu siitä, että laajeneminen tapahtuu taajama-alueiden reunoilla ja osittain jopa haja-asutusalueilla. *Aluerakenteessa tapahtunut keskittyminen on samalla merkinnyt yhdyskuntarakenteen hajautumista*. Vuosien 1991 ja 1997 välillä kaikkien suomalaisten työssäkävien henkilöiden keskimääräinen työpaikkaetäisyys (linnuntie-etäisyyksinä) kasvoi 8,7 km:stä 9,6 km:iin. Tämä merkitsee keskimäärin 150 metrin työmatkaetäisyyden kasvua vuodessa. Pääkaupunkiseudulla keskustasta pois päin johtavien säteittäisten väylien vaikutusalueella asuvien ihmisten painopisteen muutos vuosien 1960 ja 1995 välillä oli noin 60 m vuodessa keskustasta ulospäin, ja se oli tie- liikenneväylien varrella 10–20 % nopeampaa kuin raideliikenneväylien varrella (Huhdanmäki et al. 1997). Yhdyskuntien energiatehokkuuden ja kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen näkökulmasta yhdyskuntien tarpeeton alueellinen laajeneminen olisi yksi tärkeimmistä yhdyskuntasuunnittelun tehtävistä. Näin voidaan rajoittaa tarpeetonta liikenteen kasvua ja hyödyntää joukkoliikennejärjestelmien, kevyen liikenteen ja kaukolämmitysjärjestelmien tarjoamia etuja.

Maankäytön tehokkuus on ratkaiseva ominaisuus, kun määritellään alueen energia- ja liikennejärjestelmiä. *Kaukolämmitys- ja joukkoliikennejärjestelmät* edellyttävät sekä riittävän kokoista asiakasmäärää että riittävää tiheyttä ollakseen taloudellisesti kannattavia. Kaukolämpöjärjestelmällä, joka perustuu yhdistettyyn lämmön ja sähköntuotantoon, on vähäisemmät päästöt kuin suoralla sähkölämmityksellä. Maankäytön tietty tehokkuusvaatimus pätee muihinkin julkisiin palveluihin, vesi- ja jätehuoltoon, lasten päivähoitoon, kouluihin sekä myös kaupallisiin palveluihin. *Sähkö- ja tietoliikenneverkkojen* osalta käyttäjätiheys ei taajama-alueilla ole enää ratkaiseva muuttuja verkon rakentamispäätöksen kannalta, koska verkot kattavat jo kaikki rakennetut alueet, mutta haja-asutusalueilla verkon lisärakentaminen riippuu siitä, löytyykö verkon piiristä riittävää maksuhalukkuutta tarvittavia verkkoinvestointeja varten. Matalan tehokkuuden alueella etäisyydet ja infrastruktuurin verkostopituudet kasvavat pitkiksi ja saattavat muodostaa esteen palvelujen järjestämiselle. Tällöin joukko- ja kevyen liikenteen sijasta liikkuminen hoidetaan pääasiassa henkilöautoilla, mikä lisää liikkumisen energiakuluja ja päästöjä.

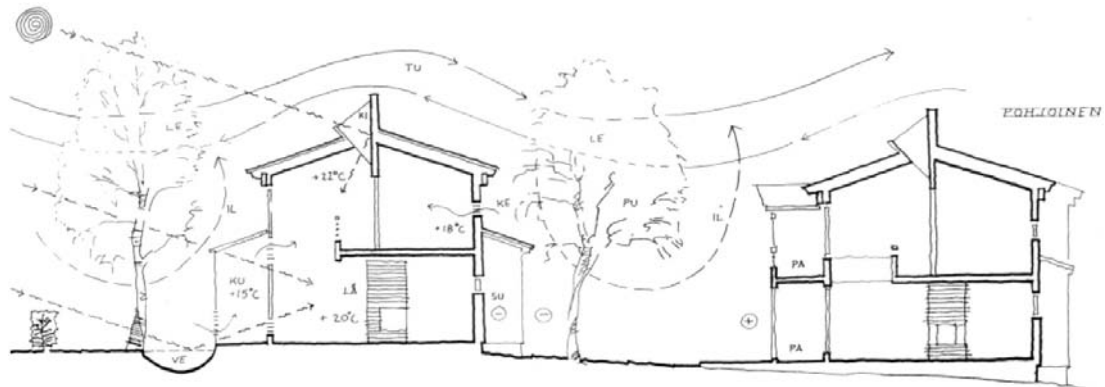
Maankäyttömerkinnät kaavoissa määrittelevät sekä ao. alueen käytön tiettyyn käyttötarkoitukseen (esim. asumiseen, toimistorakennuksiin, teollisuuteen tai kaupallisten rakennusten rakentamiseen) että ao. alueen rakentamistehokkuuden (sallittu kerrosala tontilla tai suhteessa maa-alaan). Molemmilla on merkitystä sen suhteen, millaisiksi keskimääräiset etäisyydet rakennusten ja eri toimintojen välillä muodostuvat. Pitkät etäisyydet lisäävät verkostopituuksia ja toimintojen välisen liikenteen määrää. Etäisyyksillä ja reiteillä on vaikutusta myös liikkumismuotovalintoihin (siihen käytetäänkö henkilöautoa, joukkoliikennevälineitä vai kävelläänkö tai pyöräilläänkö).

Kaavamerkinnoilla ja -määräyksillä voidaan vaikuttaa rakennetun ympäristön ominaisuuksiin ja sitä kautta syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin. Kaavoituksessa ratkaistaan mm. *kortteleiden ja liikenneverkon muodot* sekä käytettävät talotyypit. Suuria kortteleita käytettäessä syntyy todennäköisesti vähemmän yleistä liikenneverkkoa ja enemmän kortteleiden ja tonttien sisäistä liikenneverkkoa. Tällä on vaikutuksia liikennesuoritteisiin ja kevyen liikenteen määrään. Myös käytettävillä *talotyypeillä* on todennäköisiä vaikutuksia energiankulutukseen ja sitä kautta syntyviin päästöihin. Kerrostaloissa on tyypillisesti hieman pienemmät ominaislämmönkulutusluvut kuin pientaloissa, erityisesti omakotitaloissa. Sähkönkäytön ominaiskulutuksissa tilanne on päinvastoin. *Rakennusten koot ja muodot* vaikuttavat ulkovaipan suhteelliseen määrään (yhteenlaskettu ulkoseinän, ala- ja yläpohjan $m^2/rakennus-m^3$) ja sitä kautta lämmön johtumishäviöihin ja energiankäytöstä johtuviin päästöihin. Halutessaan kunta voi ohjata omistamiensa maa-alueiden rakentamista huomattavasti tarkemminkin kuin kaavoituksen ja rakennuslupamenettelyn kautta. Kunta voi luovuttaa maa-alueita rakentamiskäyttöön tekemällä ostajan kanssa *tontinluovutussopimuksia*, joissa on esim. energiataloudellisia tai päästöjen syntymistä rajoittavia ehtoja. Tällaisia ovat esimerkiksi rakennusten ulkovaippaa koskevat rakentamismääräyksiä tiukemmat lisäehdot koskien lämmöneristävyyttä, ilmanpitävyyttä, lämmöntuotantotapoja jne. Tämän tyyppisiä ehtoja on tontinluovutussopimuksiin toistaiseksi liitetty hyvin harvoin. Helsingin Viikissä edistettiin 1990-luvun lopulla ekologisen rakentamisen tapoja asettamalla tontinluovutuskilpailussa mm. energiankulutukselle sekä vähimmäistavoitteita (lämmitysenergiassa 105 kWh/brutto- m^2 ,a ja sähköenergiassa 45 kWh/brutto- m^2 ,a) että lisäpisteitä antavia vaativampia tavoitteita (esim. lämmitysenergiassa taso 85 kWh/brutto- m^2 ,a antoi 1 lisäpisteen, 65 kWh/brutto- m^2 ,a 2 lisäpistettä, sähköenergiassa vastaavasti 40 kWh/brutto- m^2 ,a ja 35 kWh/brutto- m^2 ,a).

Yhdyskuntasuunnittelulla ei ohjata vain uudisrakentamista, vaan myös olevaan kantaan kohdistuvia muutoksia. Kaavoihin merkityillä (tai lisätyillä) rakennusoikeuksilla voidaan lisätä kiinteistön omistajan kiinnostusta esimerkiksi energiataloutta parantaviin korjaustoimenpiteisiin, jolloin rakennuskannan tuottamia päästöjä voidaan vähentää merkittävästi. Asunto- ja kiinteistöosakeyhtiöt voivat näin rahoittaa energiataloudellista perusparantamistaan myymällä uudella rakennusoikeudella.

Ilmastomuutoksen torjunnassa tulee kasvihuonekaasujen päästöjen pienentämisen lisäksi varautua *päästöjen seurausten torjuntaan*. Esimerkki tällaisesta on tulvariskien torjunta. Yksityiskohtaisissa kaavoissa (asema- ja ranta-asemakaavoissa) ja kuntien rakennusjärjestyksissä voidaan määrätä vähimmäiskorkeustaso meren tai vesistön vedenpinnasta tai minimietäisyys rannasta. Tulvimista voidaan myös estää maaston muokkauksella, kuten pengerryksillä, sekä rakennusten perustusten, kellaritilojen, alikulkujen ym. ympäröivää maanpintaa alempana sijaitsevien rakenteiden suojauksella. Uusia kaavoitusperiaatteita tai määräyksiä kehitettäessä on syytä kartoittaa mahdolliset tulva-alueet ja samalla tunnistaa riskikohteet. Uusia teknologioita voidaan hyödyntää ennen kaavoitusta tehtävissä selvityksissä, itse kaavoituksessa ja seurantajärjestelmissä, esimerkiksi kehittämällä ja käyttämällä paikkatietopohjaisia tietojärjestelmiä (GPS, GIS, anturiverkot, ubicom). Tulva-alueita ja riskikohteita koskevien tietojen kerääminen tietojärjestelmiin mahdollistaa tietojen tehokkaan hyödyntämisen tarpeen tullen. Tämä on hyödyllistä koko yhdyskuntarakenteessa, mutta erityisen perusteltua yhteiskunnallisesti tärkeiden tai haavoittuvien laitosten ja toimintojen (pelastus- ja suojelutoimet, sairaalat, koulut, lasten ja vanhusten hoitopaikat, energia-, vesi-, jätehuolto- ja tietoliikenteen verkot sekä elintärkeiden tai vaarallisten aineiden varastot) sijoittelun yhteydessä.

Yhdyskuntasuunnittelun keinoihin ilmastovaikutusten torjunnassa ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä kuuluvat myös rakennusten ja ympäröivän maaston ja kasvilisuuden keskinäissuhteiden säätely. Rakennusmassojen sijoittelu topografialtaan vaihtelevassa maastossa (esim. syntyviin kylmän ilman järviin tai lämpösaariin), suhteessa ilmansuuntiin (auringon paisteeseen) ja vallitseviin tuuliin (erityisesti kylmiin pohjoistuuliin) ja suhteessa toisiinsa antavat mahdollisuuksia välttää tarpeettomia pienilmastosta johtuvia lämpöhäviöitä. Suhteelliset lämmönkulutuserot voivat tuulista, aurinkoisuudesta ja paikan lämpimyydestä johtuen olla jopa 35–40 kWh/kerros-m² vuodessa. Rakennuksen ulkovaipan lämmöneristävydestä ja tiiveydestä riippuen vaikutus voi käytännössä olla enintään 10–20 % lämmöntarpeesta. Mitä paremmin eristetty ja tiivistetty talo on, sitä pienemmät ovat ulkoisten olosuhteiden vaikutukset.



IL	VARJON JA AURINGON AHEUTTAMA TERMINEN ILMAVIRTAUS PIHALLA
KE	KESÄLLÄ KORVAUSILMA VARJON PUOLELTA
KI	KATTOIKKUNA TUULETUSREITTINÄ KESÄLLÄ
KU	LÄMMITTÄMÄTTÖMÄLTÄ AURINKOISELTA KUISTILTA KORVAUSILMA LÄMMITYSKAUTENA
LE	LEHTIPUUT SUOJAAVAT AURINGOLTA KESÄLLÄ
LÄ	LÄMPÖÄ TUOTTAVAT TOIMINNAT KESKELLE
PA	PARVEKETTA VOI KÄYTTÄÄ KORVAUSILMAN ESILÄMMITYKSEEN
PU	PUUT PUHDISTAVAT ILMAA
SU	LÄMMITTÄMÄTTÖMIEN RAKENNELMIEN MUODOSTAMA SUOJAVYÖHYKE
TU	PIENIMITTAKAAVAINEN RAKENTAMINEN PITÄÄ TUULET KATTOJEN YLÄPUOLELLA
VE	VESILAMMIKKO HEIJASTAA VALOA JA TOIMII LUMENKERÄYSPAIKKANA TALVELLA

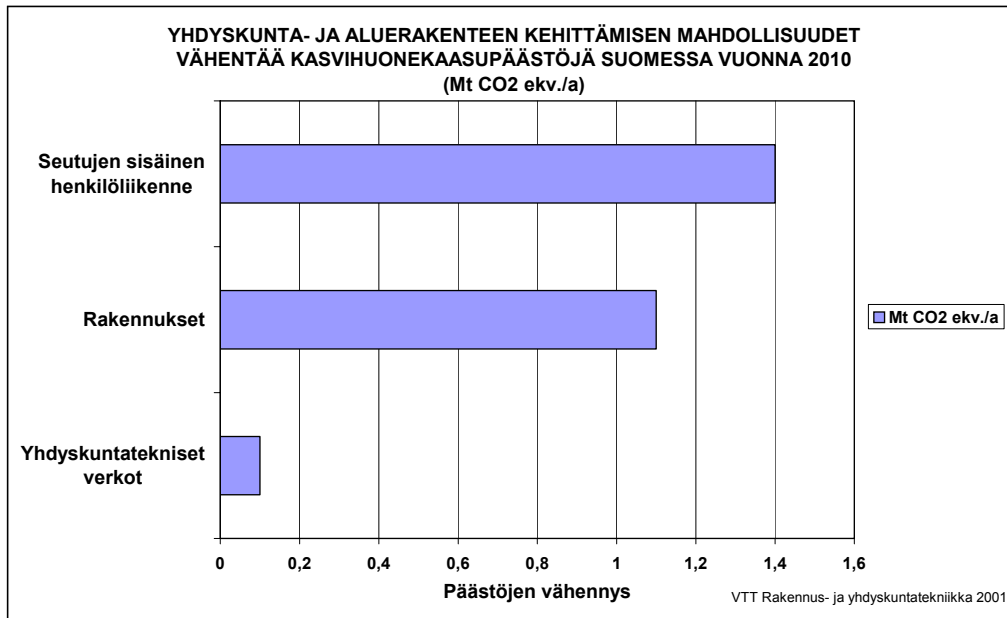
Kuva 6.19. Kaksi esimerkkiä rakennusten suhteesta ympäröivään maastoon, puustoon, aurinkoon ja tuuliin ja niiden vaikutuksista rakennusten energiankulutukseen (Kuismanen 2005).

Katuverkon ym. ulkotilojen osalta kaupunkiympäristön tuulisuuteen vaikuttavat mm. katuverkon rakenne, katujen suunnat, mutkaisuus, pitkien suorien ja aukoiden määrä, aukioita suojaavat rakennukset tai muut esteet, tuulien suunnassa suppenevien tilojen määrä (suppilo- ja tuulitunnelivaikutus) ja rakennusten korkeus. Tuulisuutta ja sen energiavaikutuksia voidaan vähentää kaupunkirakenteen tavanomaisilla elementeillä (kuten rakennuksilla, maaston muotojen hyväksikäytöllä ja puustolla), mutta tarpeen vaatiessa myös erillisillä rakenteellisilla esteillä, aidoilla, muureilla, pengerryksillä jne. Taitava suunnittelu ei lisää rakentamisen kustannuksia välttämättä lainkaan, vaan ainoastaan vähentää tulevia energiakustannuksia ja päästöjä. Erityisjärjestelyt, kuten tuulilta suojaavat rakenteet, voivat lisätä rakennuskustannuksia jonkin verran, mutta vaikutus on kokonaiskustannuksissa hyvin vähäinen (ehkä enintään 1–2 %). Kyse on enemmän ammattitaitoisen suunnittelun käyttämisestä ja osaamisesta kuin teknologisista ratkaisuista. Tietämystä energiatehokkaasta yhdyskuntasuunnittelusta ja -rakentamisesta tulee selvästi lisätä sekä suunnittelijoiden että kaikkien muidenkin rakennusalan toimijoiden keskuudessa.

6.5.2 Alue- ja yhdyskuntarakenteen vaikutukset

Kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärään voidaan vaikuttaa yhdyskuntasuunnittelulla ohjaamalla uusien alueiden rakentamista tukemaan nykyistä yhdyskuntarakennetta, sen

infrastruktuuria, jolloin aluetehokkuudet kasvavat, etäisyydet lyhenevät, kaukolämpö-verkon rakentamisedellytykset paranevat ja niiden seurauksena päästöt vähenevät. Vuonna 2001 tehdyn arvion mukaan vuosien 1990 ja 2010 välillä aikaansaatu päästövähennys olisi edellä kuvattujen toimenpiteiden seurauksena yhteensä 2,3 miljoonaa tonnia CO₂ekv verrattuna ”nykykehityksen mukaiseen” skenaarioon (Harmaajärvi et al. 2001):



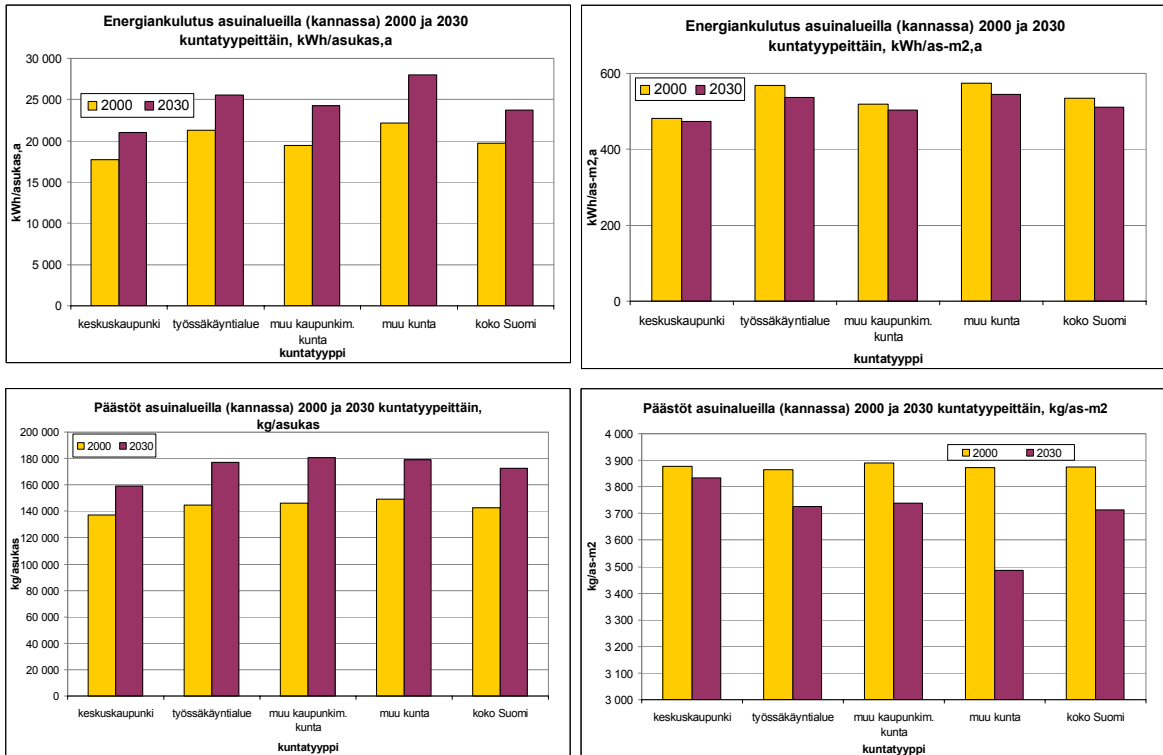
Kuva 6.20. Tavoitteellisen skenaarion mukainen kasvihuonekaasuvähennys vuonna 2010 verrattuna nykykehitysskenaarioon aikavälillä 1990–2010 toteutettavien yhdyskuntarakentamisen toimenpiteiden seurauksena. (Harmaajärvi et al. 2001)

Suurin vaikutus syntyy kaupunkiseutujen sisäisten henkilömatkojen vähennyksenä, seuraavaksi energiatehokkaampien yhdyskunta-, kortteli- ja talotyyppien soveltamisen ansiosta. Tällöin voidaan hyödyntää paremmin energiatehokkaita kaukolämpöjärjestelmiä kaikissa talotyypeissä, mutta erityisesti nykykehityksen mukaan nopeasti lisääntyvissä sähkölämmitteisissä omakotitaloissa. Aluetehokkuuden kasvamisen takia myös kaikkien yhdyskuntateknisten verkkojen pituudet lyhentyvät, jolloin niiden rakentamiseen sitoutunut ja myös käytön aikainen kasvihuonekaasujen määrä vähenee.

Suomen asuinympäristön muutosta ja sen ekotehokkuutta aikavälillä 2000–2030 arvioinut selvitys päättyi seuraaviin energia- ja kasvihuonekaasujen muutosarvioihin nykytrendejä jatkavassa ”perusurassa” (Lahti & Halonen 2006):

	per asukas (%)	per asunto-m ² (%)
energiankulutus (ml. liikenne)	+4 053 kWh/v (+20,6 %)	-24kWh/v(-4,4 %)
päästöt (joista 99 % CO ₂)	+29,8 t/v (+20,9 %)	-161 kg/v (-4,2 %).

Vuosittainen energiankulutus ja päästöt asuntoneliötä kohti vähenisivät mallilaskelman perusuran mukaan siis 30 vuodessa yli 4 % verrattuna vuoteen 2000, mutta koska asu-
 misväljyys kasvaa edelleen aika nopeasti, energiankulutus ja päästöt asukasta kohti kas-
 vavat yli 20 % verrattuna vuoteen 2000.



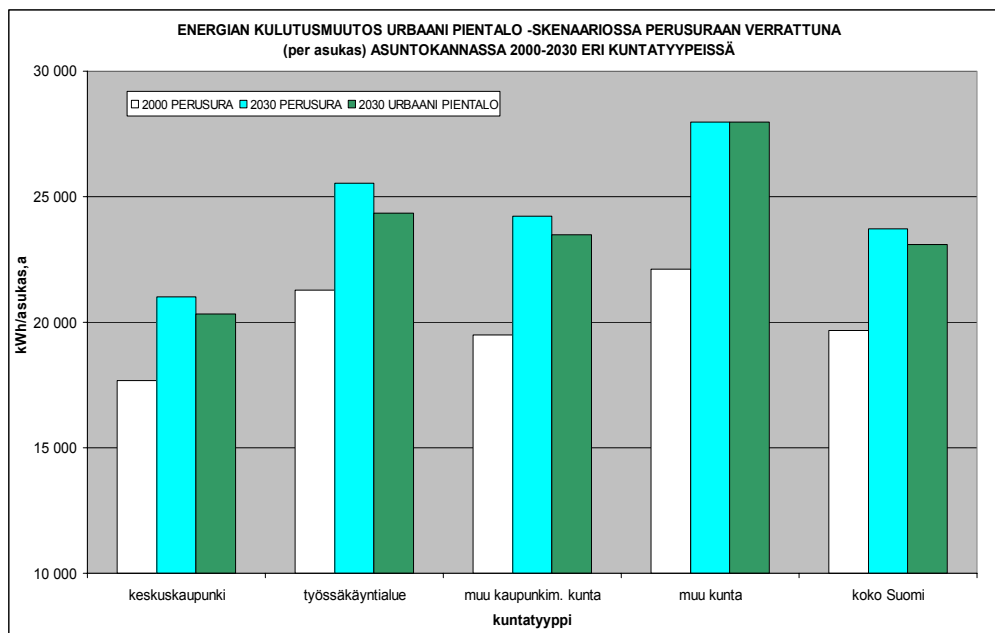
Kuva 6.21. Koko Suomen asuin ympäristöä koskevan mallilaskelman ”perusuran” mukaiset tulokset energiankulutuksen ja päästöjen muutoksista aikavälillä 2000–2030 (Lahti & Halonen 2006).

Kuvien 6.21 tarkastelussa energiankulutus (ylemmät kaaviot) sisältää sekä rakennetun ympäristön että liikenteen osuudet, kun taas päästöt (alemmat kaaviot) sisältävät vain rakennetun ympäristön osuuden. Vasemmanpuoleisissa kaavioissa ovat vaikutukset asukasta ja oikeanpuoleisissa kaavioissa vaikutukset asuntoneliötä kohti. Pylväsryhmät kuvaavat vaikutuksia eri yhdyskuntatyypeissä lähtien maakuntien keskuskaupungeista, niiden työssäkäyntialueista, muista kaupunkimaisista kunnista ja päättyen ”muihin kuntiin”. Suurimmat energiankulutusmuutokset ilmenevät toisaalta työssäkäyntialueilla eli keskuskaupunkien reuna-alueilla ja toisaalta muissa kunnissa. Näissä molemmissa ryhmissä on runsaasti hajautuvan yhdyskuntarakenteen alueita ja myös varsinaista hajarakentamista, joissa suhteellinen energiankulutus ja vastaavat päästöt ovat isompia kuin muualla. (Lahti & Halonen 2006).

Arvio perustuu väestöennusteeseen ja siitä johdettuun väestörakenteelliseen ja sen mukaiseen asunnontarpeen muutosten arvioon. Arvion mukaan Suomen asuntokannan kasvu

vuoteen 2030 mennessä on yli 61 milj. asuntoneliötä eli 31 % enemmän kuin vuonna 2000. Tämä johtuu ennen kaikkea asumisväljyyden (asuntoneliöitä asukasta kohti) kasvusta (25 %), johon vaikuttaa myös asuntokuntien keskikoon pieneneminen (joka aiheuttaa asuntojen lukumäärän kasvua), mutta edelleen jonkin verran myös väestön kasvusta ja muuttoliikkeestä. Todellisuudessa uudisrakentaminen on vielä em. nettokasvu suurempaa eli n. 79 milj. asuntoneliötä, koska myös poistuma on korvattava. Kasvu painottuu entiseen tapaan maakuntien keskuskaupunkeihin (21 % kokonaiskasvusta) ja erityisesti niiden työssäkäyntialueille (35 % kokonaiskasvusta). Väljyyden kasvu aiheuttaa sekä energiankulutuksen että päästöjen lisääntymistä keskiarvoluvuissa asukasta kohti. Asuntoneliötä kohti arvioidut muutokset ovat sen sijaan sekä energiankulutuksen että päästöjen osalta negatiivisia (eli energiansäästöä ja päästöjen vähennyksiä) johtuen rakennusten energiatehokkuuden kasvusta viime vuosien trendin mukaan (ks. kappale 6.2 ja kuva 6.5). Asunnoissa olevien sähkölaitteiden määrästä ja energiatehokkuudesta riippuu se, miten asumisen sähkönkulutus sekä asukasta että asuntoneliötä kohti kehittyy. Perusurassa on oletettu viime vuosien trendin jatkumista, mikä on ollut n. +1,5 % asuntoneliötä kohti vuodessa.

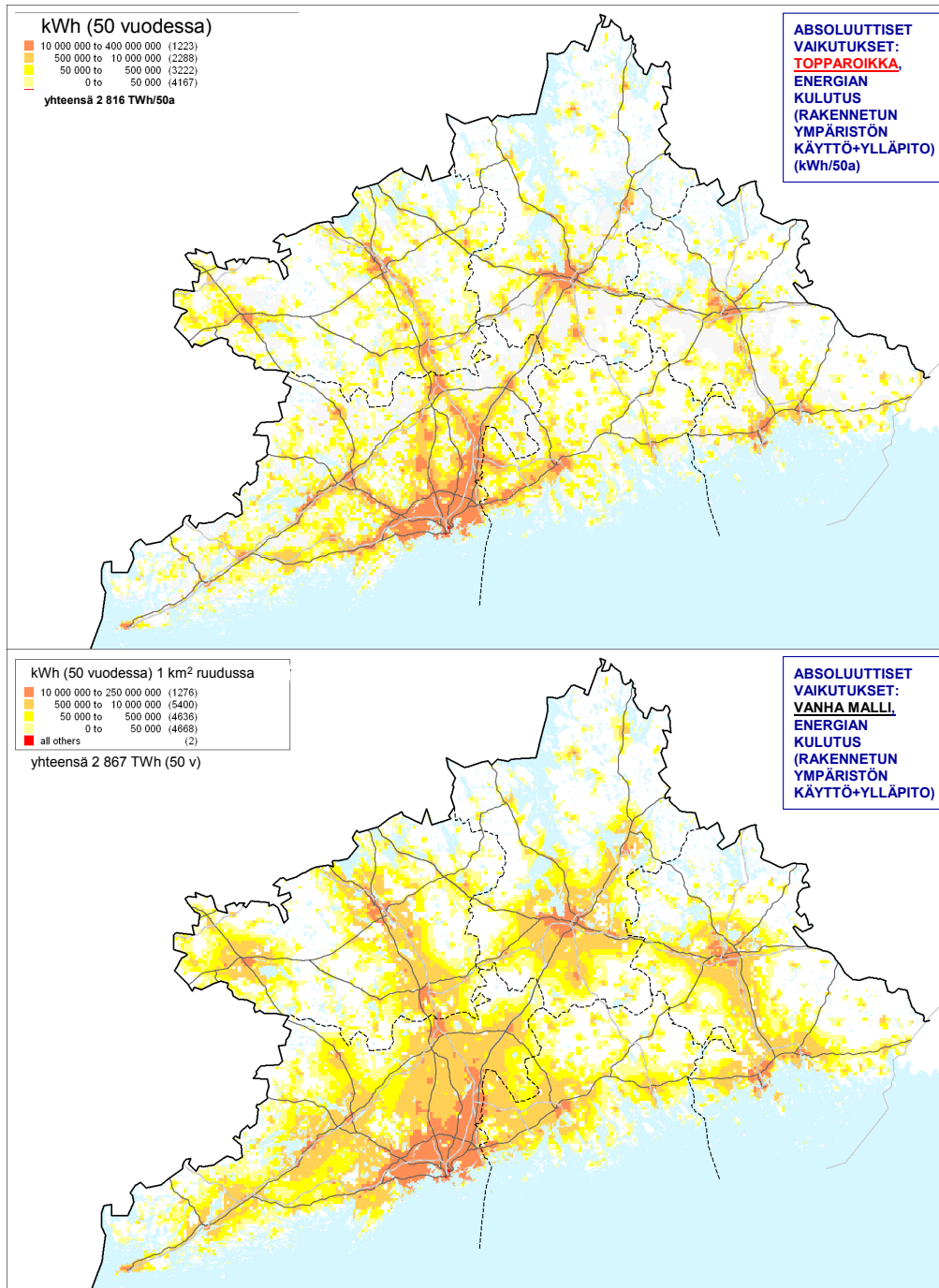
Mikäli uusi rakentaminen ohjataan yhdyskuntarakenteellisesti tehokkaampiin alue-, kortteli- ja talotyyppeihin, voidaan päästöjä vähentää verrattuna ”perusuraan”. Tehty ”kaupunkimaisen pientaloksenearion” mukainen vaihtoehto vähentäisi vuosittaista energiankulutusta noin 650 kWh asukasta kohti ja noin 14 kWh asuntoneliötä kohti.



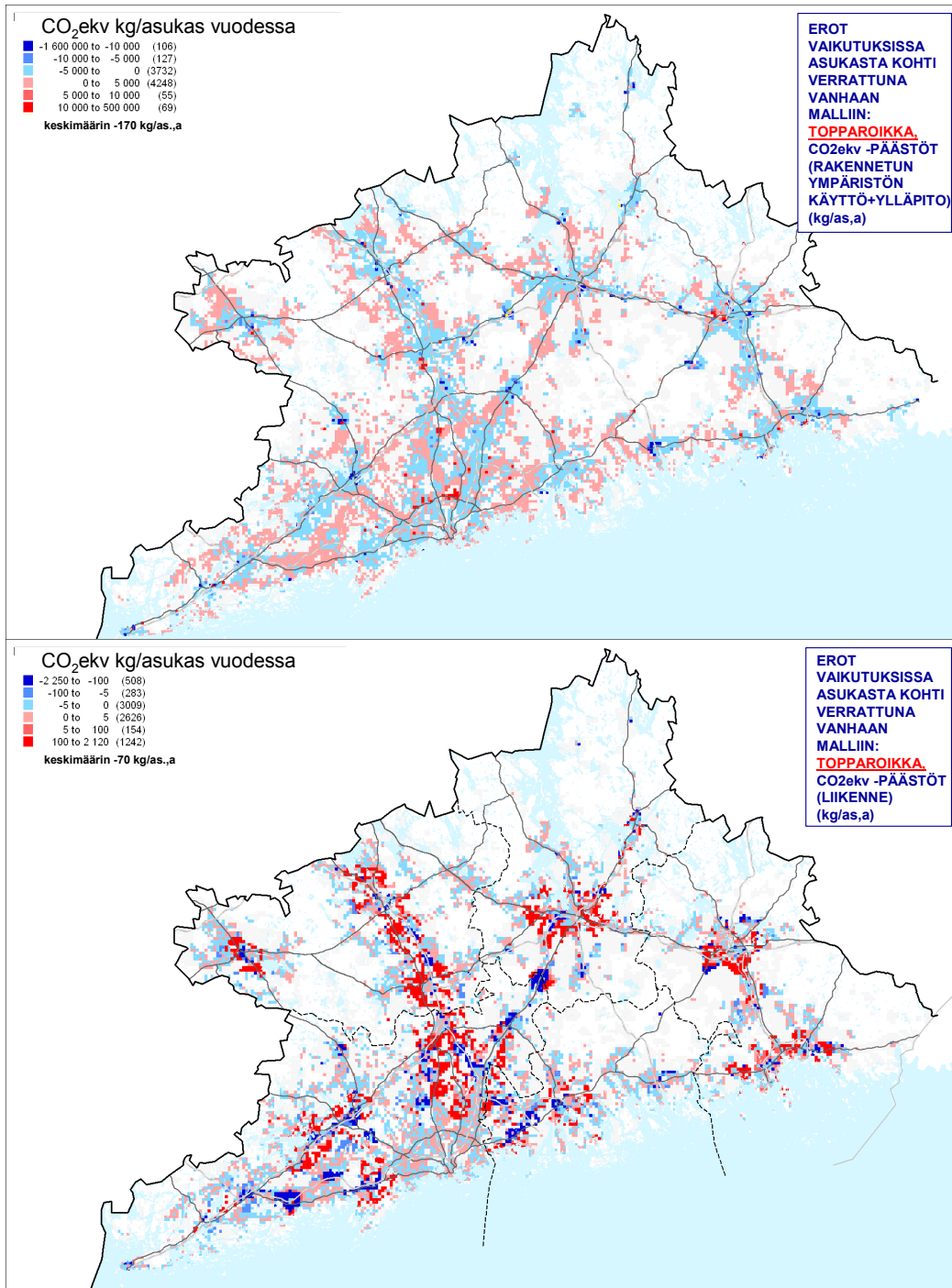
Kuva 6.22. Koko Suomen asuin ympäristöä koskevan mallilaskelman ”perusuran” ja ”kaupunkimaisen pientalon” skenaarioiden mukaiset tulokset asuinrakennuskannan lämmityksen ja sähkön käytön sekä liikenteen aiheuttamien energiankulutuksen muutoksista aikavälillä 2000–2030 (Lahti & Halonen 2006).

Tässä skenaariossa on toteutettu verrattain maltillinen ja suppean keinovalikoiman yhdyskuntarakenteellinen ohjaus. Yhdyskuntarakenteellisilla valinnoilla voidaan vähentää sekä energiankulutusta että päästöjä huomattavasti voimakkaamminkin ohjaamalla sekä uudisrakentamista että rakennuskannan parantamista hyvin valituilla keinoilla. Tällöin sovelletaan uusia energiatehokkuutta lisääviä määräyksiä tai kannustimia sekä uudisrakentamisessa että rakennuskannassa, kaukolämpöverkkoon liittymisessä, liikennejärjestelmissä (liikenneverkossa ja siihen kytketyissä liikenteen ohjausjärjestelmissä, etuajoi- oikeuksissa, pysäköintijärjestelyissä, raideliikenteen liityntäliikenteessä, liikenteen mak- suissa kuten pysäköinti- ja ruuhkamaksuissa, energiankäytön ja polttoaineiden veroissa jne.).

Seudullisessa ja maakunnallisessa suunnittelussa pyritään ohjaamaan alue- ja yhdyskun- tarakennetta. Tehty metropolialuetta koskeva kehitysselvitys vuoteen 2050 sisälsi myös erilaisten aluerakennevaihtoehtojen vaikutusarviot energiankulutukseen ja CO₂ekv- päästöihin (kuvat 6.23 ja 6.24)

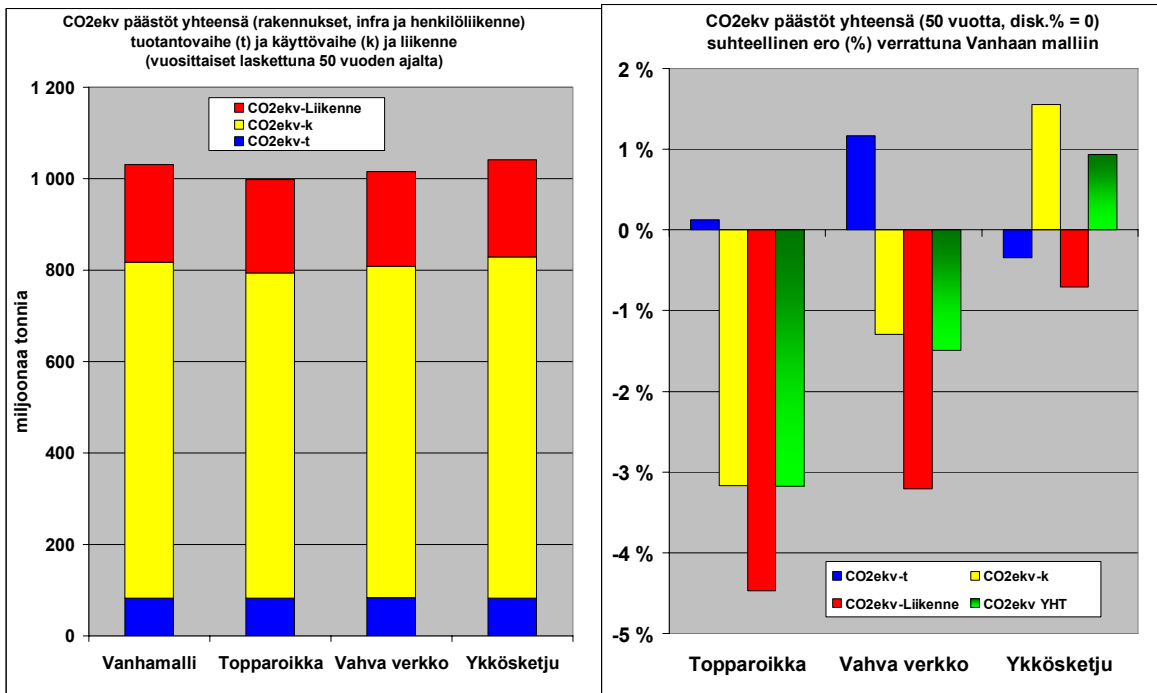


Kuva 6.23. Metropolialueen (viisi maakuntaliittoa) kehittyminen vuoteen 2050 mennessä ja sen vaikutukset rakennetun ympäristön (rakennukset ja infrastruktuuri) vuosittaiseen energiankulutukseen (kWh) 1 km x 1 km ruuduissa, kun tarkasteluvaihtoehtoina ovat aluerakennevaihtoehdot "Vanha malli" ja radanvarsiyhdyksuntien kehittämistä korostava "Topparoikka". Malli "Topparoikka" kuluttaa yhteensä 1 035 GWh vuodessa vähemmän kuin "Vanha malli". Karttoja vertailemalla näkyy, miten energiankulutukseen voidaan vaikuttaa alue- ja yhdyskuntarakennetta ohjailemalla (Lahti et al. 2008).



Kuva 6.24. Metropolialueen (viisi maakuntaliittoa) kehittyminen vuoteen 2050 mennessä ja sen vaikutukset rakennetun ympäristön (rakennukset ja infrastruktuuri) vuosittaiseen CO₂ekv-päästöihin (tonnia asukasta kohti vuodessa), kun tarkasteluvaihtoehtoina ovat radanvarsiyhdyksuntien kehittämistä korostava aluerakennemalli ”Topparoiikka” verrattuna ”Vanhaan malliin”. Ylemmässä kartassa rakennetun ympäristön (rakennusten ja infrastruktuurin) osuus päästöistä, alemmassa liikenteen osuus. Malli ”Topparoiikka” tuottaa yhteensä 657 000 tonnia vuodessa vähemmän CO₂ekv-päästöjä kuin ”Vanha malli”. (Lahti et al. 2008)

Arvioituihin neljään aluerakenteelliseen kehittämisvaihtoehtoon sisältyvät vaikutusmahdollisuudet ovat rakennetun ympäristön energiankulutuksessa yhteensä 1,5 TWh vuodessa. Lisäksi tulevat liikenteessä syntyvät vaikutusmahdollisuudet. Rakennetun ympäristön ja liikenteen CO₂ekv-päästöissä arvioitu vaihteluväli oli vastaavasti 0,7 miljoonaa t/v (rakennetun ympäristön osalta) ja 0,2 miljoonaa t/v (henkilöliikenteen osalta). Jos vertailtavat vaihtoehtoiset aluerakennemallit olisi laadittu nimenomaan ekotehokkuuden näkökulmasta, olisivat em. vaihteluvälit tietysti huomattavasti suurempia.



Kuva 6.25. Metropolialueen (viisi maakuntaliittoa) kehittyminen vuoteen 2050 mennessä ja sen vaikutukset rakennetun ympäristön (rakennukset ja infrastruktuuri) ja henkilöliikenteen vuosittaisiin CO₂ekv-päästöihin neljässä eri aluerakennemallissa. Vasemmanpuoleisessa kaaviossa elinkaaren (50 v) mukaiset kokonaisvaikutukset (miljoonaa tonnia) neljässä mallissa ja oikean puoleisessa kolmen mallin suhteellinen ero (%) verrattuna "Vanhaan malliin". Valitusta aluerakennemallista riippuen vaikutusmahdollisuudet ovat -4,5 %...+1,5 % riippuen tarkasteltavasta CO₂ekv-päästösektorista (rakennetun ympäristön tuotantovaihe, käyttövaihe, liikenne). Jokainen 1 %:n muutos vastaa vuosittaisissa kokonaispäästöissä noin 0,2 miljoonaa tonnia CO₂ekv-päästöjä. (Lahti et al. 2008)

Lähdeviitteet ja lisätietoja

de Almeida, A. T., Fonseca, P. & Bertoldi, P. 2003. Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies. *Energy*, Vol. 28, Issue 7, s. 673–690.

Electrowatt-Ekono 2005. Laiteryhmäkohtaiset sähkösäästötavoitteet, Palvelusektori ja teollisuus. Raportti 7.4.2005.

Energy Star 2008. Kansainvälisen, vapaaehtoisen energiatehokkuuden merkintäjärjestelmän Internet-sivut. <http://www.eu-energystar.org/>.

EuP 2008. Euroopan komission EuP-direktiivin toimeenpanoa varten rahoittamia tuoteryhmäkohtaisia taustaselvityksiä. http://ec.europa.eu/energy/demand/legislation/eco_design_en.htm#studies.

Euro White Cert Project 2008. Euroopan Unionin rahoittama valkoisten sertifikaattien tutkimusprojekti. <http://www.ewc.polimi.it/>.

Gynther, L., Rautiainen, K., Silvonen, S. & Suomi U. 2007. EuP-direktiivin (2005/32/EY) toimeenpanon energiavaikutusten arviointi. EuP-direktiivin ympäristö- ja energiavaikutukset, kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 24/2007, s. 43–

Halme, T., Räisänen, S., Rusanen, J. & Naukkarinen, A. 1996. Suomen aluerakenteen muutoksia eri aluetasoilla – paikkatietosovelluksia. *Nordia Tiedonantoja* 1/1996. Oulun yliopiston maantieteen laitoksen ja Pohjois-Suomen Maantieteellisen seuran julkaisusarja. Oulu 1996. 64 s.

Harmaajärvi, I., Huhdanmäki, A. & Lahti, P. 2001. Yhdyskuntarakenne ja kasvihuonekaasupäästöt, Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 522. Helsinki, 64 s.

Heljo, J., Nippala, E. & Nuutila, H. 2005. Rakennusten energiankulutus ja CO₂-ekv päästöt Suomessa. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakentamistalouden laitos. Raportti 2005:4.

Huhdanmäki, A., Lahti, P., Martamo, R. & Rauhala, K. 1997. Liikennehankkeiden kaupunkirakenteelliset vaikutukset. Arviointimenetelmän kehittäminen. YTV Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 1997:1. Helsinki 1997. 62 s.

Härkönen, H. 2008. Asiantuntijahaastattelu, Heikki Härkönen, Suomen Valoteknillinen Seura, 22.1.2008.

IEA 2006. Energy Technology Perspectives 2006 – Scenarios and Strategies to 2050. IEA, Paris, France.

IPCC 2007. IPCC Fourth Assessment Report, Working Group III Report “Mitigation of Climate Change”, Chapter 6: Residential and Commercial Buildings, s. 388–446.

Kallasjoki, T. 2006. Energiatehokkuus – yksi hyvän valaistuksen osatekijöistä. Sähköala 3/2006, s. 18–20.

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

KTM 2001. Teknologia ja kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen. Taustatyö kansallista ilmasto-ohjelmaa varten. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 1/2001.

Kuismanen, K. 2005. Matala-tiivis puurakentaminen, suunnittelu ja toteuttaminen. Econo-projektin raportti, Ab Case Consult Ltd, 25.9.2005, 39 s.

Lahti, P. & Halonen M. 2006. Asuinympäristön muutos ja sen ekotehokkuus Suomessa 2000–2030. VTT Tutkimusraportti VTT-R-03399-06. Espoo, 98 s.

Lahti, P., Halonen, M. & Wahlgren, I. 2008. Metka, ekotehokkuuden arviointi, keskeiset tulokset. Metka-seminaari, Hämeenlinna 26.2.2008, 43 s. <http://www.metkaprojekti.info/>.

Lehtonen, M., Heine, P., Kallonen, M., Lähdetie, A., Tapper, J. Vitie, M., Koski, P., Elväs, S., Rautiainen, K., Husu, T. & Silvast, A. 2007. IT-sovellukset ja energiätehokkuuden kehittäminen. Teknillisen korkeakoulun Sähköverkot ja suurjännitetekniikan julkaisuja. http://powersystems.tkk.fi/julkaisut/Climbus-IT_978-951-22-8835-9.pdf.

Motiva 2006. Selvitys työasemaympäristön sähkönsäästämahdollisuuksista.

Motiva 2007. Motiva, Kuluttajavirasto ja TUKES: Digisovittimen valinnassa kannattaa muistaa myös sähkönkulutus. Tiedote. <http://www.motiva.fi/fi/uutiskeskus/tiedotteet/view/2007-04-11-000.html>.

Nakamura, S. 2007. Blue, Green & White LEDs and Blue Laser Diodes. Esitelmä NEXT Energy 2007 -seminaarissa, Salo, 25.9.2007. <http://next.utu.fi/energy/pdf/Nakamura%20September%202007%20for%20high%20school.pdf>.

Pakarinen, R. 2004. Valonlähteet: Missä mennään – LED. Lehtiartikkeli, Valo-lehti 2/2004, s. 30–33. <http://customer.canter.fi/svs/test/upload/Valo204s30-33.PDF>.

Pohjolainen, J. 2000. Palvelujen energiataloustilaston kehittäminen, Katsauksia 2000/4, Tilastokeskus 2000.

Rouhiainen, V. 2008. Asiantuntijahaastattelu, Virve Rouhiainen, Adato Energia Oy, 7.1.2008.

Suomen sähkötukuliikkeiden liitto ry, Suomen Valoteknillinen Seura ry, Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry, Teknologiateollisuus ry 2008. Energiatohokas valaistus vähentää hiilidioksidipäästöjä ja säästää rahaa. Esitelmä, julkaisematon.

Tetri, E. 2008. Asiantuntijahaastattelu, Eino Tetri, Teknillinen korkeakoulu, Valaistuslaboratorio, 22.1.2008.

Tilastokeskus 2006a. Energiataloustilasto – Vuosikirja 2006. Sähköinen versio (pdf), Yliopistopaino, Helsinki. ISSN 1796–7015.

Tilastokeskus 2006b. Tilastokeskus, kotitaloustutkimus 2006. http://pxweb2.stat.fi/Database/StatFin/tul/ktutk/ktutk_fi.asp.

Tuominen, A. 2007. LED (Light Emitting Diode, valodiodi). Internet-artikkeli. <http://www.led1.fi/index.php?page=7&lang=1>.

Wahlgren, I., Kuismanen K. & Makkonen L. 2007. Kokkolan Vanhansatamanlahden yleiskaavan ilmastovaikutukset. Luonnos 11.12.2007.

Vainio, T., Jaakkonen, L., Nippala, E., Lehtinen, E. & Isaksson, K. 2002. Korjausrakentaminen 2000–2010. VTT tiedotteita 2154, Espoo 2002. ISBN 951-38-6067-1; 951-38-6068-X. 60 s. + liitt. 25 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2154.pdf>.

VTT 2007. Energy Use, Visions and Technology Opportunities in Finland. Edita Prima. 234 s. ISBN 978-951-37-4742-8.

7. Yhteenveto ja johtopäätöksiä

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

Tässä raportissa on esitelty vähäpäästöisten ja energiaa säästävien teknologioiden kehitysnäkymiä energiantuotannossa ja energian eri käyttösektoreilla. Raportti on laadittu työ- ja elinkeinoministeriön johdolla laadittavan uuden ilmasto- ja energiastrategian valmistelun tueksi, joten tarkasteluissa on voimakkaasti suomalainen näkökulma. Tarkastelut ulottuvat vuoteen 2050 saakka, ja toisena erityishuomion kohteena oleva vuosi on 2020, jota koskien Euroopan unioni on asettanut sitovat tavoitteet mm. kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja uusiutuvan energian osuuden lisäämiseksi.

Tätä raporttia täydentää skenaarioraportti, jossa arvioidaan energiatalousmalleja käyttäen tässä työssä analysoitujen teknologioiden kokonaisvaikutuksia Suomen energiajärjestelmään ja kasvihuonekaasupäästöihin. Skenaariotyöstä saadaan viitteitä, mitkä teknologiat olisivat kustannusmielessä tehokkaimpia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä tavoitteiden mukaisiksi ja mikä olisi kokonaistaloudellisesti optimaalinen kapasiteetti tulevaisuudessa eri energiantuotantomuodoille. Kasvihuonekaasupäästöjen ohella skenaariotarkasteluilla voidaan arvioida myös muiden päästöjen (SO₂, NO_x, hiukkaset) kehittymistä eri skenaario-oletuksilla.

Alhaispäästöisillä tuotantomuodoilla (erityisesti tuulivoima ja ydinvoima) voidaan alen-
taa päästöoikeuskustannuksia, alentaa rikki-, typpioksidi- ja hiukkaspäästöjä, vähentää riippuvuutta tuontisähköstä sekä pienentää fossiilisten polttoaineiden kustannusten noususta aiheutuvaa epävarmuutta.

Energiansäästö ja energiatehokkuus ovat kuitenkin välttämättömiä: mikäli nykyistä energian tuhlaavaa käyttöä ei pystytä rajoittamaan tehokkaasti kaikkialla maailmassa, mitkään todennäköisesti lähivuosikymmeninä saatavilla olevat vähäpäästöiset energiantuotantoteknologiat eivät riitä hillitsemään päästöjä vaadittavassa mitassa. Tämä raportti keskittyy teknologiaan, mutta myös kulutustottumuksia on muutettava voimakkaasti: on suuntauduttava voimakkaasti kohti vähän päästöjä aiheuttavaa kulutusta.

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

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

Mahdollisia teknologisia keinoja päästöjen vähentämiseksi on jo olemassa ja heti saatavilla hyvin runsaasti eri sektoreilla. Päästöjen vähennystavoitteiden saavuttamiseksi on tärkeää, että näitä keinoja saadaan viipymättä otettua käyttöön.

Kaikkialla maailmassa käynnissä oleva muutos kohti päästöttömämpiä teknologioita tuo myös suuria mahdollisuuksia uuden ja tehokkaan teknologian viennille.

Energiantuotanto

Vuoteen 2050 mennessä on Suomessa siirryttävä lähes kokonaan pois fossiilisten polttoaineiden ja turpeen käytöstä energiantuotannossa. Poikkeuksena tästä ovat ne teollisuus- tai energiantuotantolaitokset, joissa on käytössä hiilidioksidin talteenottoteknologia (CCS).

Energiantuotannossa voidaan parantaa tehokkuutta ja samalla pienentää polttoaineiden käyttöä muun muassa nostamalla sähköntuotannon hyötysuhdetta tai myös lisäämällä lämmön ja sähkön yhteistuotantoa. Suomessa yhteistuotanto on jo varsin yleistä sekä teollisuudessa että yhdyskuntien energiahuollossa.

Hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää korvaamalla fossiilisia energialähteitä ydinvoimalla ja uusiutuvalla energialla, kuten puuperäisellä energialla, tuulella, auringolla ja jätteillä. Päästöt vähenevät myös siirtymällä vähähiilisempiin polttoaineisiin, esimerkiksi hiilestä ja öljystä maakaasuun. Vesivoiman laajentamismahdollisuudet eivät ole kovin suuret.

Bioenergia

Bioenergian käyttöä voidaan Suomessa lisätä vielä tuntuvasti. Teknologian kehityshaasteita tulevaisuudessa ovat ratkaisut, jotka mahdollistavat kustannustehokkaasti

- polttoaineiden saatavuuden lisäämisen eri polttoaineketjuissa
- sähkön tuotannon entistä pienemmillä lämpökuormilla
- rakennusasteen nostamisen
- monipolttoainekäytön laajentamisen, mm. peltoenergiaan ja jätteisiin
- rakennusten lämmityksen bioenergialla
- liikenteen biopolttoaineiden ja muiden polttoainejalosteiden valmistuksen ja
- muiden päästöjen kuin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen.

Nykyistä biomassan käyttöä voitaisiin huomattavasti tehostaa kuivaamalla polttoon menevää biomassaa esimerkiksi hukkalämmöillä. Usein tämä korvaisi laitoksilla rinnakkaispolnettavia fossiilisia polttoaineita ja lisäisi biomassasta saatavaa energiamäärää.

Metsäenergian hankinnan tekniseksi maksimipotentialiksi on Metla arvioinut 110 PJ/a vuoteen 2020 mennessä, ja samalla voitaisiin ainespuun hakkuita kasvattaa. Käytännön rajoitteiden huomioiminen voi laskea hyödynnettävän määrän 70 PJ:een vuodessa. Tavoitteen asettaminen 110 PJ:een vuoteen 2050 on perusteltua. Ilmaston lämpeneminen todennäköisesti lisää metsien kasvua ja käytettävissä olevaa metsäenergian määrää.

Metsäteollisuuden sivutuotteiden ja -tähteiden, kuten mustalipeän, kuoren, purun ja lietten, osuus on todennäköisesti merkittävä tulevaisuudessakin. Vuoteen 2050 mennessä arvioidaan metsäteollisuuden yhteydessä toimivan useita erityyppisiä biojalostamoja, joten kiinteiden sivutuotteiden käytön energian ja energiajalosteiden tuotantoon arvioidaan vähentyvän 10–20 %.

Peltoenergian osalta Suomessa ollaan vasta kehitystyön alussa. Vuonna 2020 maksimissaan 150 000 hehtaarin viljelyalalla tuotetun ruokohelven energiasisältö voi olla luokkaa 16 PJ.

Vuoteen 2050 mennessä arvioidaan ensimmäisten vedessä kasvavien biomassojen (levät tai bakteerit) tuotantoon käytettävien pienmittaisten demonstraatiolaitosten olevan käytössä Suomessa teollisuuslaitosten yhteydessä.

Jätteiden energiakäyttö

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen jätehuollossa on usein hyvin kustannustehokasta.

Lisääntyvän lajittelun ja materiaalikierrätyksen lisäksi Suomeen rakennettaneen lähitulevaisuudessa muutama yhdyskuntajätteen massapolttoon soveltuva jätteenpolttolaitos lämmön tuotantoon tai CHP-tuotantoon. Jätteiden käyttö teollisuuden energiantuotannossa saattaisi olla kustannustehokasta. Biojätteistä osa kompostoidaan, ja mädätys, poltto ja terminen kaasutus ovat vaihtoehtoisia energian tuotantovaihtoehtoja. Jätteiden energiakäyttö voi kasvaa noin 15 PJ:een vuonna 2020.

Tuulivoima

Suomen maakuntaselvitysten perusteella arvioitu tekninen maksimituulivoimapotentiaali on lähes 10 000 MW (yli 30 TWh). Tästä määrästä noin 2 000–3 000 MW (6–9 TWh) olisi rakennusaikataulullisesti mahdollista toteuttaa vuoden 2020 loppuun mennessä.

Tämä on todennäköisesti perusteltu lisärakentamisen laajuus mm. EU:n uusiutuvan energian tavoitteiden toteuttamisessa. Määrä voidaan toteuttaa ilman erityisen varavoimakapasiteetin rakentamista.

Tuulivoimaloiden yksikkökoko tulee edelleen kasvamaan, ensimmäiset 5 MW:n laitokset ovat jo valmistuneet, ja ajan mittaan koko saattaa kasvaa 10 MW:iin. Osa laitoksista sijoitetaan avomerelle rakennettaviin tuulipuistoihin.

Maailman tuulivoimateknologian markkinat kasvavat parikymmentä prosenttia vuodessa, jopa nopeamminkin. Jos suomalaisten teknologiatoimitusten markkinaosuus säilyy, merkitsee tämä huomattavaa viennin kasvua.

Muut uusiutuvat energianlähteet

Sähköä tuottavien aurinkopaneelien teoreettinen potentiaali on suuri, mutta aurinkovoiman yleistymistä Suomen oloissa hidastaa tällä hetkellä pitkä takaisinmaksuaika. Aurinkopaneelit ottavat jatkuvasti teknologisia harppauksia. Tällä hetkellä markkinoilla olevien sähköpaneelien hyötysuhde on noin 15 %, mutta laboratoriossa on saavutettu jopa yli 40 %:n hyötysuhde. Aurinkolämmitysteknologia on pitkälle kehittyntä ja kilpailukykyistäkin pitkällä takaisinmaksuajalla, mille on perusteluja, sillä teknologian käyttöikä voi olla reilusti yli 50 vuotta. Suomessa aurinkosähkön ja -lämmityksen osuudet tulevat lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä todennäköisesti jäämään pieneksi, vaikka niiden kustannukset ovatkin alentuneet ja alenevan kehityksen ennustetaan jatkuvan edelleen.

Suomessa on ollut kiinnostusta myös aaltovoiman kehittämiseen, vaikka Suomen olosuhteet eivät ole globaalissa vertailussa aaltovoimalle optimaaliset. Aaltoenergiateknologiat ovat vasta ottamassa ensiaskeleitaan.

Ydinvoima

Käytössä olevien ydinvoimalaitosten käyttöiän kasvattaminen ja uudet fissioon perustuvat ydinvoimalaitokset ovat kilpailukykyisiä tapoja vähentää päästöjä verrattuna moniin muihin energiantuotantoteknologisiin päästövähennyskeinoihin. Nykyisin käytössä olevan tyyppisiin reaktoreihin nykyiset tunnetut ja todennäköiset polttoainevarat riittävät nykykulutuksella lähes 300 vuodeksi. Käytön lisääntyessä pitkällä aikavälillä, noin vuosisadan puolen välin tienoilta, on tärkeää pystyä käyttämään uraanivaroja nykyistä tehokkaammin.

Käynnissä on useita kansainvälisiä tutkimushankkeita, joissa kehitetään suljettuun polttoainekiertoon perustuvia reaktoreita. Näissä urania voidaan käyttää kymmeniä kertoja nykyistä tehokkaammin, ja myös korkea-aktiivista jätettä muodostuu oleellisesti vä-

hemmän. Tällaisia laitoksia arvioidaan tulevaan käyttöön kasvavassa määrin noin vuodesta 2030 alkaen. Tulevaisuuden mahdollisuuksia edustavat myös ns. neljännen polven reaktorit, joissa tähdätään myös sähkön, prosessilämmön ja uusien energiantantajien, kuten vedyn, yhteistuotantoon. Kokonaishyötysuhteen merkittävä kasvu tekisi tällöin myös yksikkökooltaan pienemmät laitokset taloudellisesti kilpailukykyisiksi.

Fuusioteknologian tarpeisiin olisi saatavissa polttoainetta tyydyttämään maailman energiatarve vuosittain edelleen. Fuusiovoiman tuotannosta ei myöskään syntyisi korkea-aktiivista jätettä. Fuusioteknologiaan perustuvan ydinvoiman kehitystyö on kuitenkin vielä alkuvaiheessa, eikä sen osuus todennäköisesti muodostu merkittäväksi maailman energiantuotannossa vuoteen 2050 mennessä. Fuusiovoiman kustannuksia ei voida vielä uskottavasti arvioida.

Korkea-aktiivisten ydinjätteiden loppusijoitus on konkreettisesti etenemässä muun muassa Suomessa, Ruotsissa, Ranskassa ja Yhdysvalloissa.

Hiilidioksidin erotus ja varastointi (CCS)

Hiilidioksidin erotus ja varastointi nähdään eräänlaisena välivaiheen ratkaisuna pyrittäessä vähähiiliseen yhteiskuntaan. Tarvitaan vielä runsaasti teknistä kehitystyötä, ennen kuin CCS on taloudellisesti merkittävä vaihtoehto rajoittaa päästöjä. Laajaan käyttöön maailmalla CCS tulee vasta 2020–2030-luvulta lähtien.

Suomessa erotettu hiilidioksidi jouduttaneen siirtämään varastoitavaksi maan rajojen ulkopuolelle, mikä heikentää CCS-tekniikan taloudellisuutta ja toteuttamismahdollisuuksia suhteessa muihin maihin. Arvioiden mukaan CCS:n merkitys kasvaa vuosisadan puoleenväliin saakka, jonka jälkeen sen suhteellinen merkitys saattaa pienentyä vaihtoehtoisten energiatuotantoteknologioiden kehittyessä voimakkaasti. Suomalaiselle voimalaitosteollisuudelle CCS:n kehittyminen avaa hyvin merkittäviä laitevienninmahdollisuuksia.

Polttokennot ja vetytalous

Polttokennojen käyttö fossiilisia polttoaineita käyttävässä sähköntuotannossa vähentää hiilidioksidipäästöjä polttokennotekniikan korkeamman hyötysuhteen ansiosta. Vedyn käyttö sähköntuotantoon ei ole perusteltua kuin aivan erityisissä olosuhteissa.

Polttokenno- ja vetytekniikan pääasialliset tulevaisuuden sovellukset ja suurimman päästövähennyspotentiaalinen on arvioitu olevan liikennekäytössä. EU:n vety- ja polttokennoyhteisö on arvioinut, että massatuotanto voisi alkaa vuoden 2020 tienoilla. Suomessa vedyn käyttö liikenteessä kytkeytyy Euroopassa ja muualla maailmassa tapahtuvaan kehitykseen.

Teollisuus

Suomen energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen kannalta merkittävimmät teollisuudenalat ovat metsäteollisuus, metalliteollisuus, kemianteollisuus ja mineraaliteollisuus.

Teollisuusprosessien energiankulutukseen vaikuttavat merkittävästi tuotteille asetettavat laatuvaatimukset. Pitkällä aikavälillä teollisuussektorin tarkasteluihin aiheuttaa epävarmuutta se, että tulevaisuudessa valmistettaneen tuotteita, joiden ominaisuudet ja tuotantoprosessit ovat vielä tuntemattomia. Lisäksi teollisuuden tuotantokapasiteetissa saattaa tapahtua äkillisiä vaikeasti ennustettavissa olevia muutoksia, jotka vaikuttavat sektorin kehitykseen voimakkaasti. Tästä esimerkiksi käyvät viime vuosina tapahtuneet paperitehtaiden alasajot.

Nykyisin tunnettu teknologia mahdollistaa toimenpiteitä, joilla voidaan teknisesti säästää parhaimmillaan kymmenien prosenttien energiankulutus- ja päästövähennykset lähivuosikymmenien aikana teollisuussektorilla. Teollisuuden tehostamismahdollisuudet voidaan jakaa yleisiin tehostamismahdollisuuksiin, jotka koskevat kaikkia teollisuusaloja, ja sektorikohtaisiin mahdollisuuksiin.

Sähkömoottorit, moottorikäytöt, pumppaus, puhaltimet ja paineilma kuluttavat valtaosan koko teollisuuden sähkönkulutuksesta. Teollisuussektorin sähkönkulutuksen yleisissä tehostamiskeinoissa, jotka kohdistuvat näihin energiankäyttökohteisiin, olennaista on laitteiden ja prosessien oikea mitoitus. Merkittävä päästövähennyspotentiaali on myös hukkalämpöjen hyödyntämisellä ja kierrätysmateriaalien käytön lisäämisellä. Sektorikohtaisten toimenpiteiden yksityiskohdat, kustannukset ja energiansäästöpotentiaalit vaihtelevat teollisuusaloittain. Uudet tuotteet ja tuotantoprosessit tarjoavat merkittävän päästönvähennyspotentiaalın vuosikymmenien mittaan.

Liikenne

Pääosa Suomen liikenteen kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu tieliikenteestä henkilöautoilla. Ajoneuvojen teknologinen kehitys tapahtuu pääosin muualla kuin Suomessa.

On todennäköistä, että keskipitkällä aikavälillä siirrytään yhä enemmän polttomoottoritekniologiaista joko polttokennoautoihin tai sähköautoihin. Sähköhybriditekniologia (esimerkiksi ladattavat eli ns. plug-in-hybridiautot) yleistyy jo nopeamminkin. Sekä polttokennotekniologian että sähköhybriditekniologian käyttöönotto parantaisi myös taajamien ilmanlaatua ja vähentäisi meluongelmia.

Liikenteen biopolttoaineet voivat olla osa päästöjen vähentämistä lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä. Erityisesti ns. toisen sukupolven biopolttoaineet, esim. metsätähteistä,

ruokohelvestä tai metsäteollisuuden yhteydessä toimivista biojalostamoista saatavat, vaikuttavat teknologisesti ja kustannustehokkuuden suhteen lupaavilta vaihtoehdoilta.

Tässä raportissa on käsitelty kansallisia päästöjä. Raportin ulkopuolelle jäävät kansainvälinen lento- ja meriliikenne. Kansainvälinen lentoliikenne aiheuttaa 2–3 % maailman hiilidioksidipäästöistä. Kun huomioidaan myös epäsuorat vaikutukset, IPCC:n mukaan on mahdollista, että lentoliikenteen lämmitysvaikutus on 6–10 % maailman hiilidioksidipäästöistä. Lentoliikenne kasvaa huomattavasti nopeammin kuin tekninen kehitys vähentää päästöjä. Päästöjen rajoittamisessa kuluttajien käyttäytyminen on tärkeässä osassa.

Rakennukset ja yhdyskuntarakenne

Rakentamisen matalaenergiaratkaisuilla voidaan päästä hyvin merkittäviin vähennyksiin rakennusten energiankulutuksessa verrattain pienillä kustannuksilla. Uudisrakennusten lämmitysenergiankulutus voidaan varsin helposti puolittaa nykyisestä rakennusmääräysten minimitasosta, ja tämä lisää kokonaisrakentamiskustannuksia n. 3–5 %. Tulevaisuuden passiivirakentamisella voidaan päästä vielä suurempiin vähennyksiin.

Uudisrakentamisen volyymi on vuosittain 1–1,5 % Suomen rakennuskannasta. Korjausrakentamisen piirissä on 3,5 % Suomen rakennuskannasta. Keskipitkällä aikavälillä (v. 2020 saakka) korjausrakentamisen energiansäästöpotentiaali on merkittävämpi kuin uudisrakentamisen, jonka mahdollisuuksien käyttöönotto on hitaampaa. Uudisrakentamiseen liittyvien säädösten lisäksi vaikuttavuuden kannalta on siksi tärkeää kohdistaa toimenpiteitä myös kannustamaan korjausrakentamisessa tehokkaaseen energiatalouden parantamiseen.

Öljylämmityksen määrä asuin- ja palvelurakennuksissa Suomessa on luokkaa 9 TWh, ja sen hiilidioksidipäästöt Suomessa vastaavat noin 3,6 Mton CO₂ vuodessa. Siirtyminen uusiutuviin energialähteisiin mahdollistaa öljylämmityksen aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen. Lämpöpumppujen käyttö on yleistynyt viime vuosina selvästi. Näillä voidaan huomattavasti vähentää rakennusten sähkön kulutusta. Arvioidaan, että lämpöpumppujen käyttöä voitaisiin lisätä vielä 4–9 TWh vuoteen 2020 mennessä.

Yhdyskuntarakenne on tärkeässä osassa päästöjen vähentämisessä. Ohjaamalla uusi rakentaminen yhdyskuntarakenteellisesti tehokkaampiin alue-, kortteli- ja talotyyppeihin voidaan keskipitkällä aikavälillä päästä useiden prosenttien päästönvähennyksiin verrattuna nykyisen kaltaisen kehityksen jatkumiseen. Vaikutukset voidaan jakaa rakennetun ympäristön tuotanto- ja käyttövaiheiden sekä liikenteessä saavutettaviin päästövähennyksiin.

Sähkölaitteet ja valaistus

Kotitalouksien laitteiden sähkönkulutus on kasvanut 2000-luvun alkuvuosina yli 2,5 % vuodessa. Tähän on vaikuttanut yleisen elintason nousu, joka on lisännyt rakennusten varustelutasoa sähkölaitteiden osalta. Palvelujen sähkölaitteiden ja valaistuksen sähkönkulutus on kasvanut jopa kotitalouksiakin nopeammin. Tarvitaan tehokkaita normeja säätelemään eri laiteryhmiä sähkönkulutusta.

Kotitalouksien sähkönkulutukseltaan suurimmat laiteryhvät ja käyttökohteet ovat olleet kylmälaitteet, valaistus ja kulutuselektroniikka (esim. televisiot oheislaitteineen, tietokoneet). Kulutuselektronikkalaitteiden sähkönkulutus on noussut merkittävästi kymmenen viime vuoden aikana, kun taas kylmälaitteiden ja valaistuksen osuuksien on arvioitu pienentyneen.

Valaistusteknologiassa on suuret mahdollisuudet energiankäytön tehostamiseksi. Tehokkaimpien valaistusteknologioiden hyödyntäminen voi mahdollistaa sovelluskohteesta riippuen jopa useiden kymmenien prosenttien tehostamisen valaistuksen energiankäytössä. Lyhyellä aikavälillä mahdollisuuksia tarjoaa kotitaloussektorilla yleisten tehottomien hehkulamppuvalaistusratkaisujen korvaaminen loistevalaistusratkaisuilla, kuten pienloiste- eli ns. energiansäästölamppuilla. Pidemmällä aikavälillä LED-pohjaisilta valaistusratkaisuilta odotetaan paljon.

Sähkömoottorit ja valaistus on arvioitu Suomen palvelusektorin suurimmiksi sähköä kuluttaviksi laiteryhmiä. Mahdollisia päästövähennystoimia ovat tehokkaampien sähkömoottorien sekä taajuusmuuttajien käytön lisääminen että valaistukseen liittyvät tehostamismahdollisuudet.

Sähkölaitteiden energiankulutukseen voidaan vaikuttaa myös sähkön kysynnän hallinta (Demand Side Management, DSM) -teknologioiden mahdollistaman laitteiden käytön automaation, tehokkaamman hinnoittelun ja reaaliaikaisen palautetiedon avulla. Kvantitatiiviset arviot vaihtelevat, mutta vaikutus voi olla suuruusluokaltaan 5–10 %. DSM-teknologioilla on useita muitakin potentiaalisesti myönteisiä vaikutuksia erityisesti energijärjestelmän säätö- ja huipputehon tarpeeseen. Näistä osan kvantitatiivinen arviointi on hankalaa. Näyttää hyvin todennäköiseltä, että DSM:n toteuttamiseen tarvittava teknologia on olemassa kaikilta osiltaan vuoteen 2050 mennessä, suurelta osin jo 2020–2030-luvuilla tai aikaisemminkin. Esimerkiksi energian reaaliaikaisemman mittauksen mahdollistavat 1. sukupolven AMR-järjestelmät (automaattisen mittariluvun järjestelmät) tulevat käytännössä käyttöön kaikille energiankäyttäjille jo 2010-luvulla.

Tekijä(t) Savolainen, Ilkka, Similä, Lassi, Syri, Sanna & Ohlström, Mikael (toim.)		
Nimeke Teknologiapolut 2050 Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian laatimista varten		
Tiivistelmä Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaadittavat suuret kasvihuonekaasupäästöjen vähenykset tulevat mullistamaan nykyisen pääosin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan maailman energijärjestelmän. Energiatehokkuuden parantaminen ja uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen ovat keskeisiä keinoja päästöjen vähentämisessä. Teknologian mahdollistamat keinot ovat merkittävä osa kokonaisuutta, jolla kasvihuonekaasupäästöjen rajoitukseen pyritään. Tässä raportissa esitellään teknologisia keinoja ja arvioidaan niiden mahdollisuuksia Suomen kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamiseksi. Raportissa käsitellään sekä energian tuotantoon että sen eri käyttösektoreihin – teollisuus-, liikenne- ja rakennussektoriin – liittyviä teknologioita ja niiden kehitystä tulevaisuudessa. Tarkastelu ulottuu aina vuoteen 2050 saakka, ja erityisenä huomion kohteena on myös vuosi 2020, jota koskien Euroopan unioni on julkistanut sitovat tavoitteensa. Selvityksen mukaan teknologisia keinoja päästöjen vähentämiseksi on olemassa runsaasti erilaisia kaikilla sektoreilla. Monet teknologioista ovat jo markkinoilla ja siten heti saatavilla ja käyttöön otettavissa. Päästöjä vähentävien teknologioiden käyttöönottoa hidastavat kuitenkin kustannukset ja investointien uusiutumisen hitaus. Esimerkiksi energiantuotantolaitosten käyttöikä on tyypillisesti 20–50 vuotta, ja rakennusten käyttöikä luokkaa 50–100 vuotta. Työn tuloksia hyödyntämällä suoritetaan Suomen energijärjestelmää kuvaavalla TIMES-mallilla skenaariolaskelmat, joista saadaan arvio siitä, mitkä päästöjä hillitseviä teknologioita olisi taloudellisesti edullisinta ottaa käyttöön. Skenaariotyön tulokset julkaistaan erillisenä raporttina.		
ISBN 978-951-38-7207-6 (nid.) 978-951-38-7208-3 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 23292
Julkaisuaika Toukokuu 2008	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 215 s.
Projektin nimi Energy Technology Visions 2020–50		Toimeksiantaja(t) Tekes, työ- ja elinkeinoministeriö
Avainsanat energy, technology, technology opportunities, technology foresight, deep emission reductions, climate change mitigation, energy use, energy production		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374

Author(s) Savolainen, Ilkka, Similä, Lassi, Syri, Sanna & Ohlström, Mikael (eds.)		
Title Technology pathways 2050 Deep greenhouse gas emission reductions enabled by technology in Finland. Background report for preparing the national climate and energy strategy		
Abstract Massive greenhouse gas emission reductions are needed in order to mitigate climate change. The reductions will pose dramatic changes in today's mainly fossil fuel based energy system. Improving energy efficiency and increasing the use of renewable energy sources are significant means to reduce emissions. Technology enables significant greenhouse gas emission reductions. In this report, technology opportunities to achieve emission reductions in Finland are reviewed and their potential is assessed. Both energy production technologies and technologies applied in all the end-use sectors – industry, transport and buildings sectors – are reviewed in the report. Assessment of technology development in the future is strongly emphasized in the report. The timeframe extends to 2050. 2020 is also of particular interest since the European Union has set its intermediate greenhouse gas emission reduction targets for the same year. According to the report, several opportunities to achieve emission reductions exist in all the sectors. A major part of the technology opportunities are already on the market and therefore immediately applicable. However, adoption is restricted by costs and long investment cycles in many of the applications. For example, the technical lifetime of power plants is typically 20 to 50 years, and the lifetime of buildings ranges typically between 50 to 100 years. By utilizing the results of this study, scenario calculations for the Finnish energy system using the TIMES energy system model have also been carried out. The calculations provide us with estimates on which technologies would be economically optimal to apply in order to reach the emission reduction targets. The results of the scenario calculations are documented in a separate report.		
ISBN 978-951-38-7207-6 (soft back ed.) 978-951-38-7208-3 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 23292
Date May 2008	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 215 s.
Name of project Energy Technology Visions 2020–50		Commissioned by Tekes, Ministry of Employment and the Economy
Keywords energy, technology, technology opportunities, technology foresight, deep emission reductions, climate change mitigation, energy use, energy production		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374

Ilmaston muuttumisen hillintä on valtava haaste. Jos pyritään pysäyttämään maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen, tarvitaan hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC:n) mukaan 50–85 %:n kasvihuonekaasupäästöjen vähennys vuosisadan puoliväliin mennessä. Tämä mullistaa nykyisen pääosin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan maailman energiajärjestelmän. Tässä raportissa esitellään teknologisia mahdollisuuksia päästöjen vähentämiseksi energian tuotannossa ja sen eri käyttösektoreilla Suomessa sekä arvioidaan niiden kehitystä tulevaisuudessa. Tarkastelut ulottuvat aina vuoteen 2050 asti.

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>
