



Low Carbon Finland 2050 -platform

Energiajärjestelmien kehityspolut kohti vähähiilistä yhteiskuntaa

Antti Lehtilä | Tiina Koljonen | Miimu Airaksinen |
Pekka Tuominen | Tuuli Järvi | Juhani Laurikko |
Lassi Similä | Leena Grandell

Low Carbon Finland 2050 -platform

Energiajärjestelmien kehityspolut kohti
vähähiilistä yhteiskuntaa

Antti Lehtilä, Tiina Koljonen, Miimu Airaksinen,
Pekka Tuominen, Tuuli Järvi, Juhani Laurikko, Lassi Similä &
Leena Grandell
VTT

ISBN 978-951-38-7439-1 (Soft back ed.)

VTT Technology 165

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-122X (Online)

Copyright © VTT 2014

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT

PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)

02044 VTT

Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT

PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)

FI-02044 VTT

Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland

P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)

FI-02044 VTT, Finland

Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Low Carbon Finland 2050 -platform

Energy system pathways towards a low carbon society

Low Carbon Finland 2050 -platform. Energiajärjestelmien kehityspolut kohti vähähiilistä yhteiskuntaa. **Antti Lehtilä, Tiina Koljonen et al.** Espoo 2014. VTT Technology 165. 91 p.

Abstract

Initiatives of developing roadmaps for moving to a low carbon economy by 2050 have been taken by many European authorities, including the European Commission. Using the ETSAP TIMES modeling framework as the central tool, we analyse the implications of low carbon policies within Europe, with a special focus on the Finnish energy system. The main objective of the work in the Low Carbon Finland 2050 -platform project was to identify cost-effective and robust pathways for moving into a low carbon economy by 2050, by creating a set of different scenarios for the future society and economy. The report outlines the work carried out with the VTT TIMES model, which is a global partial equilibrium techno-economic energy systems model. On the global level, the analysis considers also the energy system impacts on the depletion of known mineral resources for critical high-tech metals, many of which are closely associated with the key energy technologies of the future.

The work builds on the prior work of Koljonen and Similä (2013), but presents a further elaboration of the different storylines and pathways to a low carbon economy. In the different pathways not only the technology portfolios are changed but also the structure of the whole economy, including substantial changes in the Finnish energy intensive industries, community structures, and even consumer behaviour.

The sensitivities to uncertainties in the energy system's development with respect to key technologies and energy sources are also assessed with the help of the TIMES model. Such key sensitivity parameters include agreements on global climate policies, the viability and potential role of carbon capture and storage, sustainability of biomass resources, and the future of nuclear power in Europe. Taking into account these uncertainties, the low carbon pathways are characterised with respect to their strengths, weaknesses, opportunities and threats.

Achieving the targets for a low carbon economy is technically feasible under many different technology pathways. However, the results clearly indicate that the transition can occur most smoothly and with lowest impacts on the economies when a reasonably high diversity in the energy supply system is maintained. That would imply also the need for employing CCS, both within the energy sector and energy intensive process industries. Bioenergy remains the most important renewable energy source in all scenarios. The analysis indicates that a very high reliance on non-biomass renewables would require rapid technological development with a break-through in energy storage technology, and would entail considerable uncertainties with respect to both economy and technology.

Keywords energy systems, models, scenarios, low carbon, climate policy

Low Carbon Finland 2050 -platform

Energiajärjestelmien kehityspolut kohti vähähiilistä yhteiskuntaa

Low Carbon Finland 2050 -platform. Energy system pathways towards a low carbon society. **Antti Lehtilä, Tiina Koljonen et al.** Espoo 2014. VTT Technology 165. 91 s.

Tiivistelmä

Globaali ilmastonmuutoksen hillintä ja ilmakehän lämpötilan nousun rajoittaminen edellyttää maailman kasvihuonekaasupäästöjen radikaalia vähentämistä. Teollisuusmaiden osalta edellytetään 80–95 %:n vähennyksiä vuoden 1990 päästötasoon verrattuna, mikä on lähtökohtana myös EU:n julkaisemassa vähähiilitekartassa. Low Carbon Finland 2050 -platform -hankkeessa analysoitiin VTT:n TIMES-energiajärjestelmämallin avulla vähähiihiseen yhteiskuntaan tähtäävän politiikan vaikutuksia Euroopassa pitäen Suomen energiajärjestelmää tarkastelun keskipisteenä. Keskeisenä tavoitteena oli tunnistaa kustannustehokkaita ja robusteja polkuja vähähiilisen yhteiskunnan saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä, minkä pohjaksi luotiin joukko vaihtoehtoisia skenaarioita talouden ja yhteiskunnan tulevaisuuden kehitykselle. Globaalilla tasolla tarkasteltiin myös uuteen teknologiaan tarvittavien kriittisten metallimineraalien tunnettujen varantojen riittävyttä.

Työ oli osittain jatkoa aiemmalle VTT:n Low Carbon Finland 2050 -hankkeelle, mutta tässä työssä skenaarioita ja niihin liittyviä vähähiilipolkuja on käsitelty huomattavasti tarkemmin ja monipuolisemmin. Kunkin skenaarion taustalla olevat oletukset on laadittu johdonmukaisesti ns. skenaariotarinan mukaisesti niin teknologian, kansantalouden ja yhdyskuntarakenteen kehityksen osalta. Vaihtoehtoisiin kehitysarvioihin sisältyy myös oletuksia merkittävistä muutoksista Suomen teolliseen rakenteeseen, yhdyskuntien kehitykseen ja kuluttajien käyttäytymiseen.

Myös vähähiilitavoitteiden saavuttamisen kannalta merkittävimpien epävarmuuksien vaikutusta energiajärjestelmän kehityspolkuihin arvioitiin järjestelmämallin avulla. Keskeisimpinä epävarmuustekijöinä tarkasteltiin hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kaupallistumista, bioenergian kestävyyskriteerien vaikutuksia ja ydinvoiman lisärakentamisen näkymiä Suomessa ja koko Euroopassa. Epävarmuustekijöiden vaikutusten avulla pyrittiin arvioimaan kunkin vähähiilipolun vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia.

Vähähiilitavoitteet näyttävät tulosten valossa olevan toteutettavissa monin erilaisin teknologisten kehityspolkujen kautta. Siirtyminen vähähiiliseen yhteiskuntaan näyttäisi kuitenkin onnistuvan varmimmin ilman takaiskuja ja merkittäviä taloudellisia vaikutuksia, mikäli Suomessa energiajärjestelmän tuotantorakenne pidetään riittävän monipuolisena ja panostetaan puhtaan energiateknologian kehittämiseen ja sen tarjoamien mahdollisuuksien hyödyntämiseen. Tulosten mukaan tämä merkitsee esimerkiksi CCS-tekniologian soveltamista Suomessa osana vähähiiliteknikoiden valikoimaa sikäli kuin teknologia kaupallistuu. Bioenergia pysyy merkittävämpänä uusiutuvana energialähteenä kaikissa skenaarioissa. Hyvin voimakas tukeutuminen vaihtelevan tuuli- ja aurinkoenergian käytön lisäämiseen edellyttää tulosten valossa erittäin nopeaa teknistä kehitystä ja energian varastoinnin läpimurtoa sekä sisältää merkittäviä teknisiä ja taloudellisia epävarmuuksia.

Avainsanat energy systems, models, scenarios, low carbon, climate policy

Esipuhe

Low Carbon Finland 2050 -platform (LCFinPlat) -hankkeessa tarkasteltiin siirtymistä vähähiiliseen tulevaisuuteen ja vihreään teknologiaan liittyvän kasvun edellytyksiä. Hankkeen osapuolina toimivat VTT, Valtion taloudellinen tutkimuskeskus (VATT), Metsäntutkimuslaitos (Metla) ja Geologian tutkimuskeskus (GTK) koordinaation ollessa VTT:n vastuulla. Hanke kuuluu Tekesin Green Growth – Tie kestävään talouteen -ohjelmaan.

Tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi hankkeessa laadittiin skenaarioita, joiden avulla voidaan analysoida vähähiiliseen yhteiskuntaan siirtymistä eri sektoreilla. Skenaarioiden laatimisessa hyödynnettiin työpajoja, kyselyitä ja osapuolten laskennallisia mallityökaluja. Tässä raportissa kuvataan VTT:n globaalilla energiajärjestelmämallilla laskettujen skenaarioiden lähtökohdat ja tulokset.

LCFinPlat-tutkimusta rahoittivat Tekesin lisäksi VTT, VATT, Metla ja GTK. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi Tiina Koljonen (VTT). Muina osahankkeiden vastuullisina johtajina toimivat Juha Honkatukia (VATT), Maarit Kallio (Metla) sekä Laura Lauri (GTK). Projektin johtoryhmän puheenjohtajana toimi Pekka Tervo (TEM). Lisäksi johtoryhmään kuuluivat Magnus Cederlöf (YM), Outi Honkatukia (VM), Anne Vehviläinen (MMM), Saara Jääskeläinen (LVM) huhtikuusta 2013 alkaen, Raija Pikku-Pyhältö (Tekes) huhtikuuhun 2012 asti, sekä Christopher Palmberg (Tekes) ja Mikko Ylhäisi (Tekes) toukokuusta 2012 alkaen, Tuomo Suortti (Tekes) huhtikuuhun 2013 asti ja Kari Herlevi (Tekes) siitä alkaen, Riina Antikainen (Spinverse) marraskuuhun 2012 asti ja Kaisu Leppänen (Spinverse) siitä lähtien aina huhtikuuhun 2013 asti, Antti Asikainen (Metla), Maarit Kallio (Metla), Laura Lauri (GTK), Saku Vuori (GTK) kesäkuuhun 2012 saakka ja taas tammi-kuusta 2013 alkaen sekä Pekka Nurmi (GTK) ajalla 1.6.2012–31.12.2012, Tuomo Heikkilä (VATT), Juha Honkatukia (VATT), Satu Helynen (VTT), Tiina Koljonen (VTT), Kai Sipilä (VTT) ja Nina Wessberg (VTT). Johtoryhmän sihteerinä toimi Lassi Similä (VTT).

Hankkeen tutkijat haluavat kiittää johtoryhmää aktiivisesta osallistumisesta ja ohjauksesta.

Lokakuussa 2014

Sisällysluettelo

Abstract	3
Tiivistelmä	4
Esipuhe	5
Käytetyt lyhenteet	8
1. Johdanto	9
2. Skenaarioiden ja laskentamenetelmän kuvaus	11
2.1 Laskentamenetelmä	11
2.2 Skenaariotarinat	12
2.3 Toimintaympäristöt vähähiilipolkujen taustalla.....	14
2.4 Ilmasto- ja energiapolitiikkaa koskevat oletukset	16
3. Lähtöoletukset sektoreittain	18
3.1 Yleistä.....	18
3.2 Rakennukset	19
3.3 Liikenne	22
3.4 Metsäteollisuus.....	25
3.5 Perusmetalliteollisuus	27
3.6 Kaivannaisteollisuus	30
3.7 Muu teollisuus ja polttoaineiden jalostus	32
3.8 Maatalous	33
3.9 Energiantuotanto	36
4. Skenaariotulokset	44
4.1 Energian tuotanto	44
Energian kulutus	51
4.2 Päästöjen vähentäminen.....	59
5. Tulosten herkkyystarkastelut	64
5.1 Bioenergian tuotannon kestävyys.....	64
5.2 Ydinvoiman lisärakentaminen Euroopassa	69
5.3 Laajamittainen CCS:n kaupallistuminen.....	73
5.4 Kolmen tekijän riskikasauma.....	77

6. Kriittiset mineraalit ja vähähiiliteknologia	81
6.1 Kriittisten metallien tarkastelu vähähiiliskenaarioissa.....	81
6.2 Skenaariotulokset.....	82
7. Johtopäätökset	84
7.1 Vähähiilitavoitteiden vaikutukset eri sektoreille.....	84
7.2 Vähähiilipolkujen haasteet ja mahdollisuudet.....	86
Lähdeluettelo.....	89

Käytetyt lyhenteet

BECCS	bio-CCS (engl. Bio-Energy with CCS)
BKT	bruttokansantuote
CAES	Compressed Air Energy Storage
CCS	hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CHP	yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
EPKS	päästökaupan ulkopuolinen sektori, ei-päästökauppasektori
EU	Euroopan unioni
GTK	Geologian tutkimuskeskus
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KHK	Kioton pöytäkirjan mukaiset kasvihuonekaasut
LULUCF	maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous
MTT	Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus MTT
PKS	päästökauppasektori
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
VATT	Valtion taloudellinen tutkimuskeskus
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT

1. Johdanto

Tässä julkaisussa on esitetty yhteenveto Low Carbon Finland 2050 -platform -hankkeen (LCFinPlat) energiajärjestelmällitarkastelujen keskeisistä tuloksista ja niistä tehdyistä johtopäätöksistä. Työn tavoitteena oli tarkastella Suomen mahdollisuuksia ja haasteita siirtyä vähähiiliseen yhteiskuntaan vuoteen 2050 mennessä.

Globaali ilmastonmuutoksen hillintä ja ilmakehän keskilämpötilan nousu korkeintaan kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna edellyttää maailman kasvihuonekaasupäästöjen radikaalia vähentämistä. Nykytieteen mukaan (IPCC 2007) teollisuusmaiden osalta edellytetään 80–95 %:n vähennyksiä kasvihuonekaasujen päästöissä vuoden 1990 tasoon verrattuna, mikä on lähtökohtana myös EU:n julkaisemassa vähähiilitiekartassa (EU 2011). EU:n pitkän aikavälin tavoitteena onkin siirtyä vähähiiliseen talouteen ja samalla lisätä EU-alueen kilpailukykyä, energiavarmuutta, sosiaalista hyvinvointia sekä pienentää ympäristövaikutuksia. Low Carbon Finland 2050 -platform -hankkeessa lähtökohtana oli, että EU ja Suomi toteuttavat vähähiilitavoitteet ja asettavat KHK-päästöille 80 %:n vähennystavoitteen vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 päästötasoon verrattuna.

Voimakkaat päästövähennykset edellyttävät merkittäviä toimia ja investointeja kaikilla yhteiskunnan sektoreilla. Niiden toteuttamiseksi tarvitaan monien eri toimijoiden yhteistä tahtotilaa ja tavoitteenasettelua, joiden konkretisoimiseksi voidaan käyttää niin sanottua vähähiilitiekarttaa. Vähähiiliyhteiskunnan toteuttamiseksi voidaan osoittaa lukuisia määriä eri polkuja, joissa korostuvat teknologiset valinnat sekä oletukset yhteiskunnan rakenteesta (elinkeinorakenne, teollinen rakenne, yhdyskuntarakenne, väestörakenne jne.), kestävästä luonnonvarojen käytöstä, uuden teknologian kehityksestä ja käyttöönotosta sekä yhä merkittävässä määrin käsitykset yksityisten kuluttajien asenteista, arvoista ja valinnoista.

Monissa aiemmissä selvityksissä vähähiilisen yhteiskunnan saavuttamisen keskeisenä kriteerinä on pidetty nimenomaan vähintään 80 %:n vähennystä KHK-päästöissä vuoteen 2050 mennessä. Tämä oli lähtökohtana muun muassa vuonna 2009 julkaistussa Tulevaisuusselonteossa ja vuoden 2012 lopulla VTT:n julkaisemassa selvityksessä, jossa tarkasteltiin laajalti Suomen mahdollisuuksia siirtyä

vähähiiliyhteiskuntaan erityisesti teknologisesta näkökulmasta. Jälkimmäisessä työssä VATT arvioi myös vähähiiliyhteiskuntaan siirtymisen kansantaloudellisia vaikutuksia. Lisäksi arvioita on tehty kansainvälisessä yhteistyössä, joista mainittakoon pohjoismainen tutkimus yhteistyössä IEA:n kanssa, jossa arvioitiin kaikkien Pohjoismaiden mahdollisuuksia syviin päästönvähennyksiin verrattuna Eurooppaan ja muuhun maailmaan (IEA 2013).

Kaikkien edellä mainittujen tutkimusten johtopäätöksenä on ollut, että 80 %:n KHK-päästönvähennykset ovat toteutettavissa niin Suomessa kuin koko EU:ssa. Merkittävänä lähtöoletuksena näissä selvityksissä on kuitenkin ollut maailmanlaajuisesti sovittu sitova ilmast sopimus, joka perustuu maapallon keskilämpötilan nousun rajoittamiseen korkeintaan kahteen asteeseen. Toinen yleisesti käytetty keskeinen oletama on, että uudet vähäpäästöiset teknologiat kehittyvät riittävän nopeasti ja ne saadaan markkinaehtoisesti käyttöön, alkukehitysvaihetta lukuun ottamatta. Reaalimaailman näkökulmasta näitä oletuksia voi pitää verrattain optimistisinä. Vähähiiliyhteiskuntaan siirtymiseen sisältyy siten vielä merkittäviä poliittisia haasteita, ja lisäksi sen onnistumiseksi tarvitaan merkittäviä panostuksia uuden vähäpäästöisen teknologian kehitykseen ja markkinoille saattamiseen.

Tässä julkaisussa on esitetty VTT:n energijärjestelmämallin avulla laskettujen vähähiiliskenaarioiden vaikutuksia energiatalouteen ja analysoitu skenaariotulosten herkkyyttä joillekin keskeisimmille vähähiilipolkuihin liittyville epävarmuustekijöille. Maailmanlaajuisen ilmast sopimuksen mahdollisen epäonnistumisen vaikutuksia EU:n yksipuolisten vähähiilitavoitteiden toteuttamiseen ja taloudellisiin seurauksiin ei kuitenkaan voida tässä työssä käytetyn osittaistasapainomallin avulla syvemmin analysoida, vaan siihen tarvittaisiin esimerkiksi alueellista yleisen tasapainon mallia, jonka avulla voidaan arvioida muun muassa globaaleilla markkinoilla toimivien toimialojen kilpailukykyä

Julkaisu jakaantuu seitsemään lukuun, joista luvussa 2 esitellään laskentamenetelmä ja tarkastellut skenaariot ja luvussa 3 mallitarkastelussa käytetyt keskeiset lähtöoletukset sektoreittain. Luvussa 4 käydään läpi tärkeimmät energijärjestelmän kehitystä koskevat tulokset skenaarioiden perustapauksissa. Herkkyyksanalyysien tuloksia esitellään luvussa 5 ja vähähiiliseen yhteiskuntaa siirtymisen vaikutuksia kriittisten metallien kysyntään luvussa 6. Tuloksien merkitystä ja niistä tehtäviä johtopäätöksiä tarkastellaan lopuksi luvussa 7.

2. Skenaarioiden ja laskentamenetelmän kuvaus

2.1 Laskentamenetelmä

Energiajärjestelmäanalyysissä käytetty laskentamalli, TIMES-VTT, perustuu IEA:n ETSAP-ohjelmassa kehitettyyn TIMES-mallinnusympäristöön (Loulou et al. 2005, Loulou 2008), jota käytetään energiajärjestelmien pitkän aikavälin analyyseihin noin 50 eri maassa ympäri maailmaa. Laskentamallia on VTT:ssä sovellettu erityisesti Suomen ja muiden Pohjoismaiden energiajärjestelmien kuvaamiseen, mutta VTT:n malli sisältää myös muun Euroopan ja globaalin energiajärjestelmän kuvauksen, joka pohjautuu ETSAP-ohjelmassa kehitettyyn globaaliin TIAM-malliin (Loulou & Labriet 2008). Malli kuvaa koko energiajärjestelmän primaarienergian hankinnasta hyötyenergian kysyntään. Metodiikaltaan malli on niin sanottu osिताistasapainomalli, joka tuottaa kysynnän ja tarjonnan tasapainon kullekin mallissa kuvatulle energiahyödykkeelle. Lisäksi mallissa on kuvattu kattavasti kaikkien Kioton protokollaan sisältyvien kuuden kasvihuonekaasuun päästölähteet ja tärkeimmät päästöjen vähennystoimet. Mallin avulla voidaan tarkastella energiajärjestelmän pitkän aikavälin kehitystä erilaisissa skenaarioissa, joissa voidaan varioida oletuksia muun muassa talouskasvusta, energia- ja ympäristöpolitiikasta tai energiateknologian kehityksestä.

Energiajärjestelmämalli optimoi tulevaisuuden energian hankinnan ja loppukulutuksen teknologiavaihtoehdot kussakin tarkastellussa skenaariovaihtoehdoissa. Kotimaisen tuotannon lisäksi Suomen energihuollon kannalta oleellisia ovat myös energian siirto, yhteydet naapurimaihin ja Keski-Eurooppaan. Laskentamallissa on kuvattu kaikki Pohjoismaiden väliset sähkön siirtoyhteydet, ja tuonti- ja vientihinnat ovat siten endogeenisiä, eli mallin tuottamia. Järjestelmätarkastelu ottaa siten huomioon yhteydet Venäjälle, Viroon ja Ruotsiin, ja kunkinhetkinen sähkön kulkuun perustuu tuonnin ja viennin taloudelliseen kannattavuuteen. Sähkökaupan lisäksi mallissa on kuvattu luonnollisesti myös fossiilisten polttoaineiden ja biojalosteiden kauppa eri alueiden välillä. Lisäksi alueet voivat käydä kauppaa päästöoikeuksilla ja hiilidioksidin talteenottoon liittyvillä varastointipalveluilla.

Energiajärjestelmätarkastelussa otetaan huomioon koko energiajärjestelmä ja sen kehitystä rajoittavat tekijät. Laskentamalli ottaa huomioon eri energialähteet, energian tuotantotekniikat ja muuntoprosessit ja, energian siirron ja jakelun sekä kaikkien energiaa käyttävien sektorien loppukäyttökohteet. Järjestelmämallitarkastelujen vahvuus on juuri siinä, että ne ottavat huomioon energiajärjestelmän osien väliset vuorovaikutukset, siten että kokonaisuus toimii järkevästi. Millä tahansa sektorilla tapahtuvat muutokset heijastuvat vuorovaikutusten kautta koko energiatalouteen ja tulevat huomioon otetuiksi. Energian tuotantovaihtoehtojen rinnalla käsitellään samanarvoisina energian käytön tehostamisen investointeja. Kullakin energiaa käyttävälle sektorilla mallissa on määritelty joukko erilaisia teknologivaihtoehtoja kussakin toimialan tärkeimmistä energian käyttökohteista. Uutta, tehokkaampaa teknologiaa otetaan käyttöön sitä mukaa, kuin energian käytön tehostaminen tulee niiden avulla vanhaa tekniikkaa edullisemmaksi. Energiajärjestelmämalleilla on usein taipumus edistää energian säästötoimenpiteitä todellisuutta voimakkaammin. Tämä johtuu siitä, että mallissa säästötoimet asettuvat tuotantoinvestointien rinnalle samanveroisina ja mallin ”pääöksentekijöillä” on käytössään täydellinen informaatio. Tosielämässä säästötoimien toteutumiselle on erilaisia esteitä, muun muassa tiedon puutetta, kilpailevia hankkeita sekä erilaisia ns. transaktiokustannuksia, jotka vaikuttavat säästötoimien toteutukseen.

Käytetyssä laskentamallissa on kuvattu suuri joukko energian loppukäytön tekniikkavaihtoehtoja niin teollisuuden toimialoilla, palveluissa, kotitalouksissa, rakennusten lämmityksessä, maataloudessa ja liikenteessä. Eri tekniikkavaihtoehdot luovat malliin kullekin energiahyödykkeelle kysynnän jouston energian hinnan funktiona. Tämän lisäksi mallin kysyntöjen rajapinnassa on kuvattu myös hyötyenergian kysynnän joustot oman hintansa muutosten suhteen.

2.2 Skenaariotarinat

LCFinPlat-hankkeessa muodostettiin neljä vaihtoehtoista vähähiilisen Suomen tulevaisuuskuva ja niihin liitettyä skenaariotarinaa, jotka nimettiin seuraavasti:

- Jatkuva kasvu
- Pysähdys
- Säästö
- Muutos.

Näiden neljän skenaarion lisäksi laskettiin Baseline eli ns. perusskenario, joka noudattaa vuonna 2013 päivitetyn energia- ja ilmastostrategian lähtökohtia, sekä Base-80%-skenario, jossa oletukset ovat samat kuin Baselineissa lukuun ottamatta 80 %:n KHK-päästövähennystavoitetta vuoteen 2050 mennessä.

Lähtökohtaisesti kaikissa skenaarioissa Baseline-skenaariota lukuun ottamatta Suomi ja muu EU toteuttavat 80 %:n KHK-päästövähennystavoitteen vuoteen 2050 mennessä. Skenaario-oletuksissa globaali ilmastopöytäkirja toteutuu muissa

paitsi Pysähdys- ja Baseline-skenaarioissa. Jatkuvan kasvun skenaariossa talouden kasvu ja teknologinen kehitys ovat suotuisia ja vastaavasti Pysähdys-skenaariossa vaatimattomia. Säästö-skenaariossa teknologian kehitys on Jatkuvan kasvun skenaariota hitaampaa, mutta toisaalta siinä panostetaan erityisesti energia- ja resurssitehokkuuteen ja 80 %:n päästöjen vähennystavoite pyritään saavuttamaan ”etuajassa”, jo vuonna 2040. Muutos-skenaario puolestaan edustaa suotuisan talouskasvun skenaariota, jossa tapahtuu muita skenaarioita huomattavasti radikaalimpia muutoksia sekä teknologisesta että koko yhteiskunnan näkökulmasta. Alla kuvassa 1 on esitetty tiivistelmä skenaarioista. Tarkempia tietoja skenaarioiden välisistä eroista esitellään lähtöoletusten osalta luvussa 3 ja skenaariotulosten osalta luvuissa 4 ja 5.

Skenaario	Pääkohdat Suomen näkökulmasta
Jatkuva kasvu	”Äly-yhteiskunta”: Globaali 2 asteen ilmastopoliittinen tavoite toteutuu, taloudellinen menestys, kansainvälistyvä, avoin yhteiskunta, nopea teknologian kehitys, teollisuuden rakennemuutos, tiivistyvä yhdyskuntarakenne
Pysähdys	”Ilmastokriisi”: Ilmakehän lämpötilan nousu yli 4 astetta => taloudellinen kriisi, sulkeutuva yhteiskunta, teknologian kehitys hidasta, nykyinen teollinen ja yhdyskuntarakenne
Säästö	”Moderni öljykriisi”: Globaali 2 asteen ilmastopoliittinen tavoite toteutuu viivästyneesti => EU:n ilmastopoliittinen etunoja, konservatiivinen teknologiankehitys, energia- ja resurssitehokkuus korostuu, hidastuva talouskasvu, sulkeutuva yhteiskunta, nykyinen teollinen ja yhdyskuntarakenne
Muutos	”Älykäs kuluttaja”: Globaali 2 asteen ilmastopoliittinen tavoite toteutuu, korostaa radikaaleja innovaatioita, talousjärjestelmä erilainen => palvelut korostuvat, työ ja vapaa-aika sekoittuvat, kansainvälistyvä, avoin yhteiskunta, hieman hajaantuva yhdyskuntarakenne, teollisuuden rakennemuutos

Kuva 1. Vähähiiliskenaarioiden kuvaukset.

Yllä kuvatut kuusi skenaariota, Baseline, Base-80%, Jatkuva kasvu, Pysähdys, Säästö ja Muutos, muodostavat työssä laskettujen skenaarioiden perustapaukset. Perustapauksen lisäksi työssä tehtiin herkkyyksianalyyskejä joidenkin vähähiilipolkujen toteutumisen kannalta keskeisimpien epävarmuustekijöiden suhteen. Näiksi tekijöiksi valittiin seuraavat:

- Bioenergian käytölle asetettavat kestävyyskriteerit
- Lisäydinvoiman rakentaminen Suomessa ja koko Euroopassa

- Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kaupallistuminen
- Riskikasauma, jossa kolme edellä mainittua tekijää toteutuvat yhtä aikaa.

2.3 Toimintaympäristöt vähähiilipolkujen taustalla

Työssä analysoidut vähähiilipolut perustuvat erilaisiin oletuksiin seuraavien vuosikymmenten aikana kehitykseen olennaisesti vaikuttavien muuttujien kehityskululta. Seuraavassa kuvataan vähähiilipolkujen tausta-ajatuksia yleisellä tasolla. Kuvauksen tarkoitus on kertoa skenaarioiden taustaksi hahmoteltujen toimintaympäristöjen välisistä eroista ja peruslogiikasta. Tarkemmin eri vähähiilipolkujen oletuksia on esitetty jäljempänä luvussa 3.

Jatkuva kasvu

Globaali ilmastopöpinus vähintään 80 %:n kasvihuonekaasupäästövähennyksistä teollisuusmaissa on voimassa, jolloin KHK-päästöoikeuksilla on selkeä globaali hinta. Globaalin ilmastopöpinuksen myötä ilmastomuutos kyetään hillitsemään noin kahteen asteeseen kustannustehokkaasti. Kansainvälinen järjestelmä ja poliittinen ilmapiiri ovat vakaat, mikä mahdollistaa tehokkaasti toimivan kansainvälisen kaupan ja jatkuvan talouskasvun.

Jatkuvan kasvun skenaariossa panostetaan voimakkaasti uusien teknologioiden ja palvelukonseptien kehitykseen ja käyttöönottoon. Luonnonvarojen käyttö toteutetaan tehokkaasti intensiivituotantoon varatuilla alueilla, minkä johdosta suomalaisten ekosysteempipalveluiden merkitys kasvaa. Biotalousden innovaatiot muodostavat perustan elinvoimaiselle ja kasvavalle, mutta rakenteeltaan nykyisestä poikkeavalle metsäteollisuudelle. Kaivosteollisuus on Suomessa kasvava teollisuudenala etenkin korkean teknologian tuotteiden aiheuttaman kysynnän kasvun ansiosta. Uusien tuotteiden vienti vetää, ja vaihtosuhde kehittyy Suomen kannalta suotuisasti.

Kaupungistuminen on voimakasta, ja keskittymät yhdyskuntarakenteessa tarjoavat alustan innovaatioiden syntymiselle ja hillitsevät liikennesuoritteiden kasvua. Mahdollisuus myös maaseutumaisempaan asumiseen säilyy vakaiden olojen ja suotuisan talouskasvun ansiosta.

Pysähdys

Kansainvälisessä taloudessa on suuria häiriöitä, joiden seurauksena protektionismi ja alueellinen klikkiytyminen voimistuvat. Epävakaassa ympäristössä prioriteetit muuttuvat, jolloin globaalia ilmastopöpinusta ei pystytä solmimaan. Ilmaston lämpenemisen eteneminen aiheuttaa sosiaalisia, ympäristöllisiä ja taloudellisia vahinkoja. EU ja sen mukana myös Suomi pyrkivät silti yksipuolisesti toteuttamaan

80 %:n KHK-päästövähennystavoitteen vuoteen 2050 mennessä. EU:n talouskehitys ajautuu pitkäaikaiseen hitaan kasvun vaiheeseen.

Suomen BKT-kehitys on kituliasta, uusien teknologioiden kehitys ja käyttöönotto on vaatimatonta, ja Suomen vienti on vaikeuksissa myös lähialueille. Suomen tuottavuuskasvu on heikkoa ja vaihtosuhte heikkenee. Julkisten palveluiden osuus kansantuotteen kasvusta korostuu.

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) saadaan vain rajoitetusti käyttöön¹, mikä vaikeuttaa ilmastotavoitteiden kustannustehokasta saavuttamista. Kotimaiset, perinteiset ratkaisut korostuvat teollisuustuotannossa. Metsien käyttö kohdistuu perinteiseen perusteollisuuteen ja energiantuotantoon, myös kaivosteollisuudessa perusmetallien tuotanto on suhteessa merkittävämpää. Teknologian kehityksen ja käyttöönoton hitauden vuoksi luonnonvarojen saatavuus heikkenee, energian ja resurssien käytön kokonaishyötysuhde pienenee ja energiaketjun osuus arvonnäköisestä kasvaa. Yhdyskuntarakenteen uudistuminen hidastuu, ja julkisen liikenteen kehittymisnäköymät ovat heikot. Myös rakennuskannan uusiutuminen ml. korjausrakentaminen on hitaampaa.

Säästö

Ilmastopöytäkirja 80 %:n kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksistä on voimassa. EU toteuttaa päästövähennyksiä nopeutetulla aikataululla muuhun maailmaan verrattuna, ja sen toimet keskittyvät erityisesti energiansäästöön. Päästöjen aikais-tettu hillintä näkyy suoraan tuotteiden hinnoissa siten, että ”kaikki on kallista”, ml. kuljetuskustannukset. Uuden teknologian kehitys ja käyttöönotto on hidasta ja alueellinen regulaatio voimakasta. Kaiken kaikkiaan kansainvälisen kaupan edellytykset ovat heikkomat, joten Suomen vienti kohdistuu suurimmaksi osaksi lähimarkkinoille.

Viennin merkitys Suomen taloudessa vähenee, jolloin julkisen kulutuksen merkitys kasvaa. Energiaomavaraisuus korostuu: kotimaisten energialähteiden käyttöä edistetään voimakkaasti, ja ydinvoiman lisärakentamista energiavaihtoehtona ei rajoiteta. Metsää hyödynnetään tehokkaasti raaka-ainelähteenä tuotteille, joilla on kysyntää Suomen lähialueilla. Tuotantorakenne uusiutuu, mutta hitaahkosti. Kaivannaisteollisuuden tuotannossa etenkin perusmetallien tuotanto on merkittävässä osassa.

Rakentamisen voimakas sääntely parantaa rakennusten energiatehokkuutta myös korjausrakentamisessa. Liikenteen toimenpiteet keskittyvät ennen kaikkea suorit-

¹ CCS:n oletetaan olevan käytössä ainoastaan öljyn- ja kaasutuotannon, sementin valmistuksen ja terästeollisuuden yhteydessä. Hiilidioksidin varastointi on mahdollista toteuttaa ainoastaan hiipuviin ja käytöstä poistettuihin öljy- ja kaasukenttiin.

teiden vähentämiseen, jolloin erityisesti panostetaan julkisen liikenteen kehittämiseen. Kulutustottumukset ja kuluttajien arvot muuttuvat kestävyyttä suosiviksi, jolloin kulutus kohdistuu enenevästi "välttämättömiin" tuotteisiin. Tuotteiden kestävyys, käytettävyys ja käyttöikä ovat arvossaan. Säästö-skenaarion toimintaympäristö ajaa tehokkaaseen resurssien käyttöön ja energiatehokkuuteen, mikä luo uusia mahdollisuuksia myös Suomen vientiteollisuudelle.

Muutos

Globaali yhteiskunta toimii monessa mielessä idealistisesti: samat säännöt, tasainen tulonjako, valistuneet kansalaiset sekä rauhalliset ja vakaat olot mahdollistavat ihmisten vapaan valinnan. Globaali ilmastopimus on voimassa, ilmastomuutos pystytään hillitsemään noin kahteen asteeseen.

Suorittavan työn merkitys vähenee, kun robotiikka ja muut innovaatiot korvaavat työvoimaa. Työ ja vapaa-aika sekoittuvat, yhdyskuntarakenne hajaantuu ja asuntokanta pientalovaltaistuu. 3D-tulostuksen kehitys ja yleistyminen muuttavat perinteisiä tavarantuotanto- ja hankintaketjuja, mikä vaikuttaa esimerkiksi palvelualojen ja kotitalouksien sähkönkäyttöön. Suomessa biotalouden innovaatiot mahdollistavat esimerkiksi muovien, rehujen, energian, lääkkeiden, kemikaalien ja ruoan tuotannon bioraaka-aineista. Metsiin ja puuhun perustuvista uusista tuotteista merkittäviksi nousevat 3D-tulostukseen soveltuvat biomateriaalit, fibrilliselluloosa, tekstiilikuidut, päällystemateriaalit ja rakentamiseen soveltuvat komposiitit. Kaivosteollisuus kasvaa korkean teknologian tuotteiden valmistuksessa tarvittavien kriittisten mineraalien osalta. Perusmetallien kysyntä laskee tehostuneen kierrätyksen, korvaavuuden ja materiaalitehokkuuden ansiosta.

Sähköntuotanto-, verkko- ja ICT-teknologian innovaatiot sekä vakaat olot tehostavat uusiutuvan energian hyödyntämistä ja sähkön siirtoa jopa EU:n, Afrikan ja Aasian laajuisesti (esim. ns. SuperGrid). Edellytykset uusiutuvien energialähteiden läpimurrolle ovat muutenkin hyvät, sillä hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) saadaan teknisistä, taloudellisista tai poliittisista syistä vain rajoitetusti käyttöön. Ydinvoiman lisärakentaminen Suomessa rajoittuu rakenteilla olevaan viidenteen reaktoriin. Liikenteessä sekä ajoneuvoteknologia että ohjausjärjestelmät kehittyvät nopeasti.

2.4 Ilmasto- ja energiapolitiikkaa koskevat oletukset

Työssä kasvihuonekaasuina tarkasteltiin kaikkia kuutta Kioton sopimuksen käsittelemää kasvihuonekaasua CO₂-, CH₄-, N₂O, SF₆, HFC- ja PFC. Vähähiilitavoitteet ilmaistiin EU:n osalta näiden kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen vähentämistavoitteina, ja koko maailman osalta maapallon keskilämpötilan nousulle asetettuna kattona. Asetetut EU:n päästötavoitteet koskevat EU:n päästöjä kokonaisuutena, ilman sitovia maakohtaisia tavoitteita.

Perusskenaariossa (Baseline) käytettiin ilmasto- ja energiapolitiikasta ja sen kehityksestä seuraavia oletuksia:

- Nykyiset vuoden 2020 politiikat ovat voimassa vuoteen 2030 asti (EPKS-tavoitteet -16% vuoteen 2005 verrattuna, uusiutuvien energialähteiden käyttö 38% loppuenergiankulutuksesta).
- Nykyisten verojen ja tukien oletetaan olevan voimassa koko tarkasteluhorisontin ajan, syöttötariffeja lukuun ottamatta.
- Syöttötariffien taustalla olevia uusiutuvan energian lisäystavoitteita simuloitiin asettamalla tavoitteiden mukaisia vähimmäistasoja, esimerkiksi tuulivoiman tuotannolle ja metsähakkeen käytölle.
- EU:n päästökauppajärjestelmän hintatason oletettiin nousevan tasaisen hitaasti, vain 20 € :n tasolle vuonna 2035 ja 30 € :n tasolle vuonna 2050.

Päästökaupan hintaa lukuun ottamatta myös vähähiiliskenaarioissa käytettiin edellä mainittuja ilmasto- ja energiapolitiikan perusoletuksia. Päästökaupan sijasta niissä asetettiin EU:n vähähiilitiekartan mukainen vähintään 80% :n kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoite vuodelle 2050 verrattuna vuoden 1990 päästöihin, ja siihen johtava välitavoitteiden polku. Välitavoitteina olivat noin 25% :n vähennys vuonna 2020, 40% :n vähennys vuonna 2030 ja 60% :n vähennys vuonna 2040, kun vuoden 2050 tavoite oli 80% . Säästö-skenaariossa oletettiin kuitenkin 80% :n vähennystavoite asetettavan jo vuodelle 2040, jolloin myös välitavoite vuodelle 2030 oli hieman tiukempi, ja myös vuoden 2050 tavoitetta kiristettiin vähän, 83% :iin.

Globaalia ilmastopimusta simuloitiin asettamalla 2 °C :n enimmäislämpenemistä koskevan tavoitteen mukainen yläraja kasvihuonekaasujen pitoisuuden kasvun aiheuttamalle säteilypakotteelle. Pysähdys-skenaariossa simuloitiin vastaavasti 4 °C :n lämpenemistä asettamalla säteilypakotteelle sitä vastaava rajoite.

3. Lähtöoletukset sektoreittain

3.1 Yleistä

Työssä käytetty globaali energijärjestelmämalli käsittää 17 aluetta, joista Suomi, Ruotsi, Norja ja Tanska ovat kukin omana alueenaan. Jokaisen alueen osamallissa on kuvattuna yhteensä noin 2000 eri energian tuotannon, konversion, jakelun ja käytön sekä muiden prosessien teknologiaa, jotka voidaan jakaa olemassaolevan laitokannan tekniikoihin ja uusinvestointeihin käytettävissä oleviin tekniikkavaihtoehtoihin. Myös olemassaolevan laitos- ja laitekannan kapasiteettien käytöstä poistumisen aikataulut on kuvattu mallissa.

Teknologiatietojen lisäksi mallin tietokannassa on muun muassa kaikkien energiaressurssien ja teknisten tuotantopotentiaalien kuvaus (ottaen huomioon myös kestävyyskriteerit erityisesti biomassan osalta), eri alueiden välisten energiahyödykkeiden kauppavirtojen kuvaus, energiapalveluiden kysynnän kehitysarvot, sekä monia eri uusien tekniikoiden markkinaosuuden kehitystä koskevia rajoituksia, joita kaikkia voidaan varioida skenaarioittain. Mallin koko kuvauksen muodostava tietokanta on siten erittäin laaja, eikä tässä julkaisussa voida käydä läpi eri tekniikoita tai energialähteitä koskevia oletuksia yksityiskohtaisesti.

Jäljempänä käsitellään kuitenkin tarkasteltujen vähähiiliskenaarioiden kannalta keskeisimpiä käytettyjä lähtöoletuksia seuraavien sektoreiden osalta:

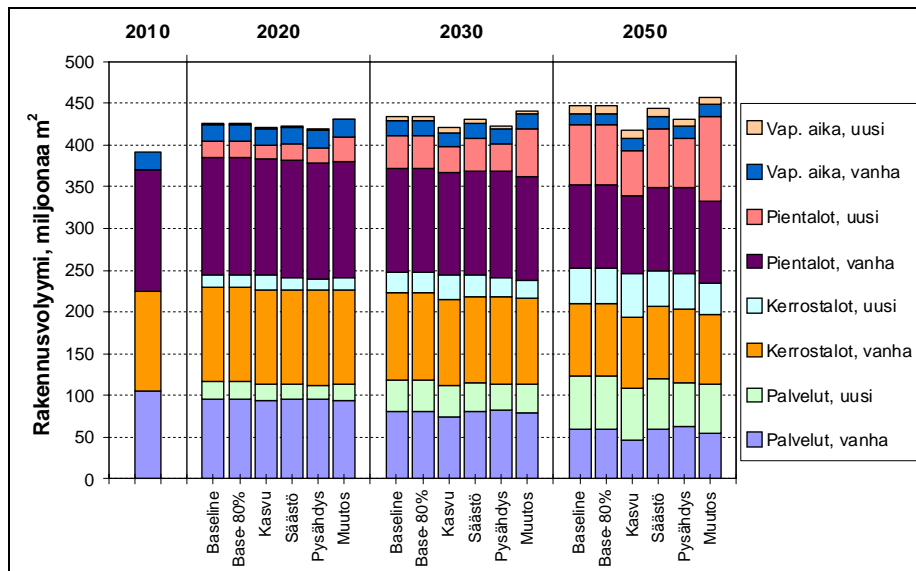
- Rakennukset
- Liikenne
- Metsäteollisuus
- Perusmetalliteollisuus
- Kaivannaisteollisuus
- Maatalous
- Energiantuotanto.

3.2 Rakennukset

Rakennuskannan energiankulutuksen kehitysarvioiden pohjana on skenaario, joka perustuu virallisiin tilastoihin ja VTT:n ennusteisiin tulevasta kehityksestä. Ennakoidut uudisrakentamisen määrät ja vanhojen rakennusten poistuma vaihtelevat sekä rakennustyypeittäin että ajanjaksoittain. Asuntotuotantoennuste perustuu Suomen väestön määrän ja rakenteen kehitykseen (Vainio et al. 2012). Arvioiden taustalla olevista oletuksista on esitetty yhteenveto taulukossa 1.

Rakennuskannan kehitysarvioina olivat Baseline ja siitä kaksi poikkeavaa kehityskulkua, jotka oli laadittu Jatkuva kasvu -skenaariota ja Muutos-skenaariota varten. Säästö-skenaariossa on käytetty rakennuskannan osalta samaa kehitystä kuin Baseline-skenaariossa, ja Pysähdys-skenaarion kannan kehityksen oletettiin olevan Kasvu- ja Säästö-skenaarioiden välimuoto.

Laaditut rakennuskannan kehitysarviot päättyvät vain 7–16 % kasvuun asuin- ja palvelurakennusten kokonaiskannassa vuosina 2010–2050. Uudisrakentamisen oletetaan siis kaikissa skenaarioissa vähenevän merkittävästi aiempaa alemmalle tasolle kuin mitä historiallinen kehitys on ollut, sillä esimerkiksi vuosina 2000–2010 vastaava kannan kasvu oli Tilastokeskuksen tilastojen mukaan noin 19 %. Skenaarioissa käytettyjä lähtöoletuksia rakennuskannan kehityksestä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Suomen asuin- ja palvelurakennuskannan oletettu kehitys vuosina 2010–2050.

Taulukko 1. Tiivistelmä skenaarioiden taustalla olevista oletuksista.

	Baseline	Säästö	Jatkuva kasvu	Muutos
Yhdyskuntarakenne	Hajaantuu hieman	Hajaantuu hieman	Tiivistyy	Hajaantuu tuntuvasti
Asuntokanta	Pientalovaltaistuu	Pientalovaltaistuu	Pientalokantavakaa, keskusta-asuminen kasvaa	Pientalovaltaistuu voimakkaasti
Muu rakennuskanta	Kasvaa maltillisesti	Kasvaa maltillisesti	Liike- ja palvelurakennusten ala vähenee haja-asutusalueilla	Palvelurakennusten tarve ja määrä kasvavat
Uudisrakentamisen energiatehokkuus	Paranee maltillisesti	Paranee tuntuvasti	Uusi teknologia mahdollistaa suuret parannukset	Uusi teknologia mahdollistaa suuret parannukset
Korjausrakentamisen energiatehokkuus	Etenee maltillisesti	Etenee nopeutetusti	Uusi teknologia mahdollistaa suuret parannukset	Uusi teknologia mahdollistaa suuret parannukset

Rakennuskannan energialaskenta on tehty REMA-laskentatyökalulla (Airaksinen & Vainio 2012, Tuominen et al. 2014) perustuen edellä esitettyihin rakennuskannan oletettuihin kehityskuluihin. Erityyppisten rakennusten lämmitysenergiankulutuksen oletetaan kehittyvän joko Baselineen mukaisesti, perustuen rakennussäädösten odotettavissa olevaan tiukentamiseen, tai nopeutettua tahtia. Taulukossa 2 on esitetty oletetut uusien rakennusten ominaisenergiankulutukset lämmityksen osalta skenaariokohtaisesti. Luvut sisältävät myös lämpimän käyttöveden. Uusien asuinrakennusten energiankulutusten voidaan katsoa Baselineen tapauksessa vastaavan vuoteen 2030 mennessä matalaenergiarakentamista ja muissa skenaarioissa pohjoisten ilmasto-olosuhteiden passiivirakennusta. Taulukossa 3 on esitetty vastaavasti vanhan rakennuskannan ominaiskulutusten kehitys.

Baseline-skenaariossa energiakorjauksia on oletettu tehtävän vain kun rakennus- tai rakennusosa on päätetty korjata jostakin muusta syystä. Säästö-skenaariossa on oletettu tehostettu energiakorjaustoiminta siten että rakennukset korjataan uudisrakennuksen tasoon ja korjauksia tehdään noin kaksinkertainen määrä Baselineen verrattuna. Muutos- ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa oletetaan energiakorjausten tapahtuvan tehostettuna ja uudenlaisten teknologioiden tulevan nopeassa tahdissa käyttöön ja mahdollistavan suhteellisen pienin kustannuksin merkittäviä energiaparannuksia. Tällaisia teknologioita voivat olla esimerkiksi älykkäät ohjausjärjestelmät, supereristemateriaalit ja erilaiset eristävät pinnoitteet.

Taulukko 2. Uusien rakennusten lämpöenergiankulutus (kWh/m²/a) sisältäen rakennusten lämmityksen ja lämpimän käyttöveden.

Skenaario	2010	2020	2030	2050
Pientalot				
Baseline	123	90	90	90
Säästö	123	90	55	55
Jatkuva kasvu / Muutos	123	90	55	50
Kerros- ja rivitalot				
Baseline	70	69	69	69
Säästö	70	69	64	64
Jatkuva kasvu / Muutos	70	69	64	50
Liike- ja palvelurakennukset				
Baseline	107	71,5	71,5	71,5
Säästö	107	71,5	71,5	71,5
Jatkuva kasvu / Muutos	107	71,5	71,5	55

Taulukko 3. Vanhan rakennuskannan lämpöenergiankulutus (kWh/m²/a) sisältäen rakennusten lämmityksen ja lämpimän käyttöveden.

Skenaario	2010	2020	2030	2050
Pientalot				
Baseline	181	168	153	130
Jatkuva kasvu	181	144	106	94
Säästö	181	162	141	116
Muutos	181	143	106	91
Kerros- ja rivitalot				
Baseline	179	160	145	124
Jatkuva kasvu	179	137	99	89
Säästö	179	139	102	82
Muutos	179	141	101	91
Liike- ja palvelurakennukset				
Baseline	254	223	190	146
Jatkuva kasvu	254	192	135	113
Säästö	254	195	140	106
Muutos	254	195	136	112

3.3 Liikenne

Oletukset liikenteen kehitykset perustuvat suurelta osin VTT:n aiemmassa Low Carbon Finland -hankkeessa laadittuihin kysyntä- ja teknologia-arvioihin (ks. Koljonen & Similä 2012). Henkilöliikenteen kysyntään ja sen liikennemuodoittaiseen jakaumaan vaikuttavat erityisesti väestön ja yhdyskuntarakenteen sekä ostovoiman kehitys, ja tavaraliikenteen kehitykseen näiden lisäksi talouden rakenteellinen kehitys. Myös väestön ikääntyminen vaikuttaa omalta osaltaan sekä henkilö- että tavaraliikenteen määriin.

Karkeasti voidaan arvioida, että mitä tiiviimpi on yhdyskuntarakenne, sitä pienempi on tarvittava liikennesuorituksen määrä. Yhdyskuntarakenteen tiiviys vaikuttaa myös voimakkaasti julkisen liikenteen tehokkuuteen ja kilpailukykyyn. Informaatio- ja viestintäteknologian (ICT) avulla voidaan myös tehostaa liikennettä ja vähentää fyysisen liikenteen määrää. Toisaalta yhdyskuntarakenteen keskittyminen ja vapaa-ajan lisääntyminen voivat lisätä vapaa-ajan liikennettä, jonka kysyntää julkinen liikenne ei pysty tyydyttämään.

Tavaraliikenteen volyymeihin vaikuttaa kansantalouden ja erityisesti teollisuuden rakenteen kehitys oletettavasti vielä yhdyskuntarakennetta voimakkaammin. Suomessa raskaan teollisuuden kuljetukset ovat muodostaneet merkittävän osan tavaraliikenteestä, mutta tulevaisuudessa tuotanto voi painottua materiaalistien tuotetonnien sijasta enemmän virtuaalisiin, palvelukeskeisiin tuotteisiin, joiden kuljetustarve poikkeaa perinteisistä teollisuustuotteista. Toisaalta sähköinen kaupankäynti on jo 2000-luvun alussa lisännyt huomattavasti kevyttä tavaraliikennettä, ja tämän kehityksen voidaan olettaa jatkuvan lähitulevaisuudessa.

Tarkastelluista skenaarioista Baseline-skenaarion liikenteen kysyntä on pyritty muodostamaan siten, että liikenteen kysynnän kehitys vastaa mahdollisimman hyvin oletettuja talouden ja yhdyskuntarakenteen kehitysarvioita Suomen energiajärjestelmän perusurassa. Jatkuva kasvu -skenaarion kysyntäarvioiden pohjana on aiemman Low Carbon Finland -hankkeen skenaario, jonka taustaoletukset olivat talouden ja yhdyskuntarakenteen osalta hyvin samankaltaisia. Säästö-skenaarion kysyntäarviot pohjautuvat osin Baseline-skenaarioon ja osin aiemman hankkeen toiseen samankaltaiseen skenaarioon, kuitenkin siten, että julkisen liikenteen ja tavarajunaliikenteen markkinaosuuksia oletetaan edistettävän politiikkatoimin.

Pysähdys-skenaariossa on pyritty ottamaan huomioon hitaamman talouskasvun vaikutuksia liikennemäärien kehitykseen, vaikkakin melko varovaisesti. Ero Baseline-skenaarioon on vuonna 2050 henkilöliikenteen kokonaisvolyymissä noin 11 % ja tavaraliikenteen volyymissä noin 5 %. Nopeimman teknologisen muutoksen Muutos-skenaario puolestaan pohjautuu pääsoin logistisesti tehokkaaseen Jatku-

Taulukko 4. Liikenteen ja liikennejärjestelmien kehityksen keskeisiä ajureita koskevia oletuksia.

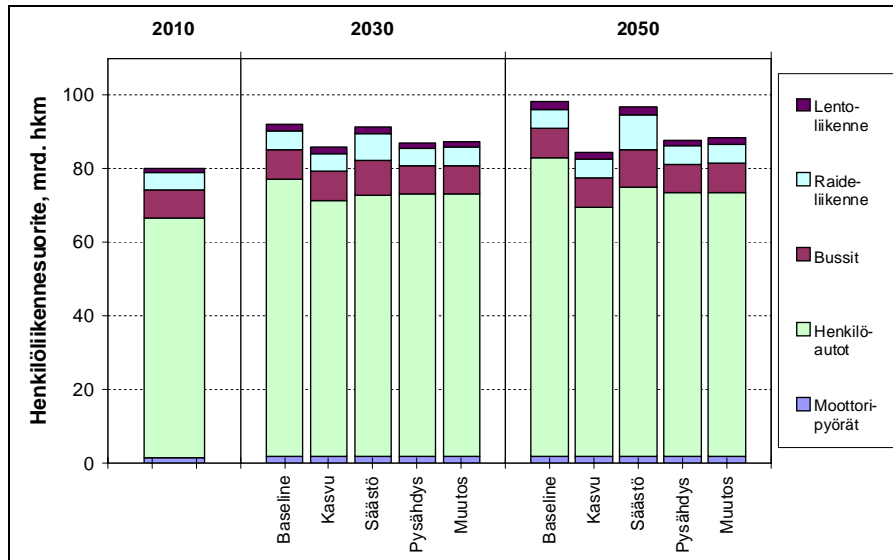
Liikennejärjestelmän ajurit	Baseline	Jatkuva kasvu	Säästö	Pysähdys	Muutos
Talouden rakenne	Raskas teollisuus säilyy	Uudet ja innovatiiviset tuotteet	Raskas teollisuus säilyy	Teollisuustuotannon heikko kasvu	Uudet ja innovatiiviset tuotteet
Yhdyskuntarakenne	Nykyisen kaltainen	Urbaani ja keskittyvä	Hajaantuva	Nykyisen kaltainen	Lievästi hajaantuva
Henkilöliikenteen volyymit	Kohtuullinen kasvu	Kasvu pysähtyy	Kohtalainen kasvu, siirtymää julkisiin	Hidas kasvu	Hidas kasvu
Tavaraliikenteen volyymit	Tuntuva kasvu	Maltillinen kasvu	Kohtuullinen kasvu, raideliikenne kasvaa	Kohtuullinen kasvu	Maltillinen kasvu
Tekninen kehitys	Tavanomainen kehitys	Nopea	Tavanomainen mutta tehostuva	Hidas	Nopea

va kasvu -skenaarioon mutta osin aiemman hankkeen hajaantuvaa yhdyskuntarakennetta edustaneeseen skenaarioon, joten liikennesuoritteiden kysynät ovat Muutos-skenaariossa jonkin verran Jatkuva kasvu -skenaariota suurempia.

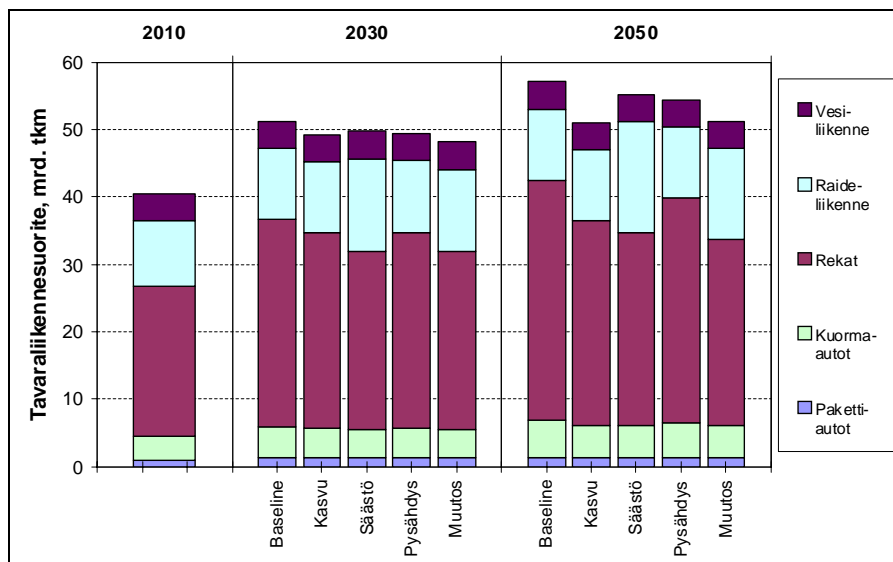
Liikenneteknologian on oletettu kehittyvän tavanomaiseen tahtiin Baseline-, Base-80% ja Säästö-skenaarioissa. Jatkuva kasvu ja Muutos -skenaarioissa uusien ajoneuvotekniikoiden kehitys ja käyttöönotto on sen sijaan oletettu huomattavasti nopeammaksi kuin edellä mainituissa skenaarioissa. Pysähdys-skenaariossa uuden tekniikan oletetaan tulevan markkinoille kaikkein hitaimmin, sillä muun muassa kuluttajien ostovoiman muita skenaarioita heikompi kehitys johtaa kysynnän kohdistumiseen tavanomaista teknologiaa edustaviin ajoneuvoihin.

Uuden teknologian kehitystä koskevat oletukset kohdistuvat pääosin hybridi-ajoneuvoihin, sähköautoihin ja polttokennoajoneuvoihin. Näitä tekniikoita edustavien ajoneuvoluokkien hankintakustannusten, energiatehokkuuden ja enimmäismarkkinaosuuksien on oletettu kehittyvän Jatkuva kasvu ja Muutos -skenaarioissa muita skenaarioita suotuisammin.

Skenaarioita varten laadittuja arvioita henkilö- ja tavaraliikenteen kotimaan liikennesuoritteiden kehityksestä on havainnollistettu kuvissa 3 ja 4 .



Kuva 3. Suomen kotimaan henkilöliikenteen oletettu kehitys vuosina 2010–2050.



Kuva 4. Suomen kotimaan tavaraliikenteen oletettu kehitys vuosina 2010–2050.

3.4 Metsäteollisuus

Metsäteollisuus on Suomen teollisuuden merkittävin energiantensiivinen toimiala ja se on itse tärkeä puuperäisen energian tuottaja ja kuluttaja. Lisäksi erityisesti saha- ja vaneriteollisuuden tukkipuun ostomäärä vaikuttaa välillisesti energiantuotantoon käytettävissä olevan kanto- ja oksahakkeen korjuupotentiaaliin. Puubiomassan korjuumäärä vaikuttaa metsien hiilinieluun eli kykyyn lisätä puustoon ja maaperään sitoutuneen hiilen määrää. Metsäteollisuuden ja muun metsäsektorin osalta Low Carbon -skenaarioiden määrittelystä vastasi Metsäntutkimuslaitos. Lähtöoletuksia on kuvattu tarkemmin erillisessä julkaisussa (Kallio et al. 2014), mutta keskeiset taustaoletukset on koottu taulukkoon 5.

Tulevaisuudessa digitaalisen median ja muiden paperia korvaavien elektroniikkalaitteiden käytön oletetaan entisestään kasvavan ja supistavan yhä paperin kulutusta. Tarkastelluissa skenaarioissa Suomen paino- ja kirjoituspaperien kysynnän oletetaan hiipuvan, lukuun ottamatta Baseline ja Base-80% -skenaarioita, joissa kysynnän oletetaan pysyvän lähempänä Suomen nykyisen tuotantokapasiteetin tasoa vuoteen 2050 saakka. Tässä suhteessa näiden perusuran luonteisten skenaarioiden kehitys ei vastaa yleisesti vallitsevaa näkemystä painopaperien kysynnän laskevan trendin jatkumisesta. Voimakkaimmin paino- ja kirjoituspaperien kysyntä alenee skenaarioissa Muutos, Jatkuva kasvu ja Pysähdys.

Pakkauskartonkien kysynnän oletetaan säilyvän vuoteen 2025 asti ennallaan kansainvälisen kaupan kasvun ja nettikaupan yleistymisen ansiosta. Myöhemmin kysynnän kuitenkin oletetaan kääntyvän laskuun Baseline-skenaariota lukuun ottamatta. Voimakkaimmin kartonkien kysyntä alenee Muutos-skenaariossa, jossa oletetut voimakkaat teknologiset muutokset, kuten paikallista valmistusta suosiva robottiteknologia ja 3D-tulostaminen, vähentävät tuotteiden kuljettamiseen tarvittavaa pakkaamista.

Perinteisten massa- ja paperituotteiden rinnalle tai sijaan oletetaan tulevan jonkin verran uusia massa- ja kuitutuotteita kaikissa skenaarioissa, mutta erityisesti niiden kysyntä ja tuotanto kasvavat skenaariossa Jatkuva kasvu ja Muutos, joissa vuonna 2050 tuotetaan kolme miljoonaa tonnia tällaisia uusia tuotteita Suomessa. Nämä tuotteet käsittävät muun muassa puusta valmistettuja tekstiilikuituja, nanosellua ja uusia pinnoitemateriaaleja.

Liikenteen nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoa voidaan Suomessa integroida energiatehokkaasti kemiallisen metsäteollisuuden tuotannon yhteyteen. Skenaarioissa investoinnit uusiin biojalostamoihin jätettiin suurelta osin laskentamallin optimoitaviksi, mutta niiden tuotanto oletettiin suurimmaksi Jatkuva kasvu, Säästö ja Muutos -skenaarioissa, joissa sen vähimmäismääräksi asetettiin 0,6 miljoonaa tonnia vuodesta 2030 lähtien.

Taulukko 5. Metsäteollisuuden kehitystä koskevat keskeisimmät skenaario-oletukset.

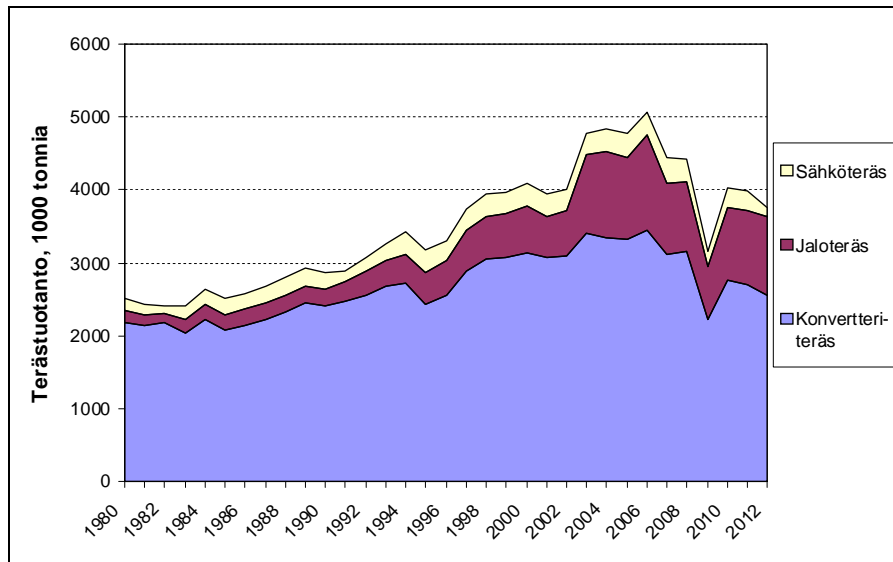
Kohde \ skenaario	Baseline / Base-80%	Jatkuva kasvu	Säästö	Pysähdys	Muutos
Paperien tuotanto	Lähes nykytasolla	Vähenee alle puoleen	Vähenee noin puoleen	Vähenee yli kolmanneksella	Vähenee lähes puoleen
Kartonkien tuotanto	Kasvaa huomattavasti	Vähenee hieman	Lähes nykytasolla	Vähenee hieman	Lähes nykytasolla
Uudet paperituotteet	Ei juuri uusia tuotteita	Nopeasti kasvava tuotanto	Vähäinen merkitys	Ei juuri uusia tuotteita	Nopeasti kasvava tuotanto
Uudet kuitutuotteet	Vähäinen merkitys	Kuitua tekstiileihin ja hygieniatarvikkeisiin, nanoselluloosa	Tuntuva määrä (noin miljoona tonnia)	Vähäinen merkitys	Kuitua tekstiileihin ja hygieniatarvikkeisiin, nanoselluloosa
Perinteisen vientisel-lun tuotanto	Kasvaa jonkin verran	Kasvaa tuntuvasti	Kasvaa tuntuvasti	Kasvaa jonkin verran	Vähenee hieman
Sahatavaran tuotanto	Kasvaa vähän	Kasvaa jonkin verran	Kasvaa merkittävästi	Kasvaa jonkin verran	Vähenee reippaasti
Uudet puutuotteet	Vähäinen merkitys	Komposiitit ja gluelam kasvualoja	Jonkin verran	Vähäinen merkitys	Komposiitit voimakas kasvuala
Prosessiteknologia	Tavanomainen kehitys	Nopea kehitys	Energiätehokkuus kasvaa	Tavanomainen kehitys	Nopea kehitys
Integroidut biopolttoainetalostamot	Väh. muutama tuotantoyksikkö	Laaja tuotanto (väh. 0,6 Mt)	Laaja tuotanto (väh. 0,6 Mt)	Väh. muutama tuotantoyksikkö	Laaja tuotanto (väh. 0,6 Mt)

3.5 Perusmetalliteollisuus

Perusmetalliteollisuus on yksi Suomen vientiteollisuuden keskeisistä perinteisistä toimialoista. Rauta- ja terästeollisuus on mainittu Suomen kasvihuonekaasuinventaareissa yhdeksi merkittävimmistä päästölähteistä. Perusmetallien valmistuksen osuus Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä oli noin 7 % vuonna 1990 ja noin 8 % vuonna 2010. Myös toimialan osuus sähkön kokonaiskulutuksesta on varsin suuri, noin 7 %. Terästeollisuuden tuotannon toteutunut kehitys vuosina 1980–2012 on esitetty kuvassa 5.

Perusmetallien valmistuksen toimialan kehitystä koskevat keskeiset skenaariooletukset on esitetty taulukossa 6. Kuvassa 6 on esitetty oletusten mukainen terästeollisuuden tuotannon kehitys vuoteen 2050.

Toimialan päästöjen tärkeimpiä vähentämiskeinoja ovat tuotantoprosessien energiatehokkuuden parantaminen, uudet polttoaineet ja tuotantoprosessit sekä CCS. Suomessa käytössä olevan teräksen valmistuksen tuotantoteknologian energiatehokkuutta ei voida radikaalisti parantaa, sillä prosessien energiatehokkuus ei ole enää kaukana termodynaamisesta minimikulutuksesta. Tällaisten prosessien tehokkuutta voidaan parantaa vain pienin askelin minimoimalla energiahäviöitä niin sähkönkäytöissä kuin termisissä prosesseissa. Päästöjä voitaisiin kuitenkin vähentää pienin prosessimuutoksinkin esimerkiksi korvaamalla fossiilista hiiltä biopelkistimillä.



Kuva 5. Suomen terästeollisuuden tuotannon kehitys vuosina 1980–2012.

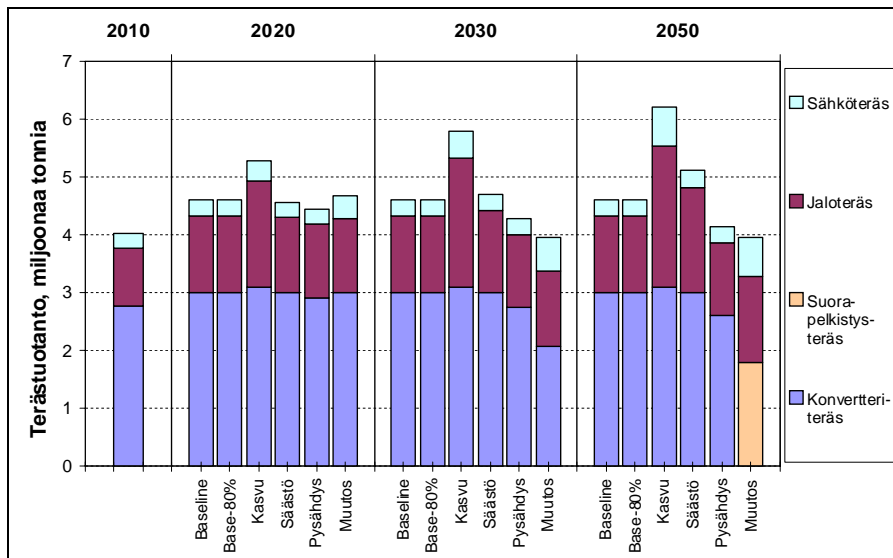
Taulukko 6. Metallin perusteollisuutta koskevat keskeisimmät skenaario-oletukset.

Kohde \ skenaario	Baseline	Base-80%	Jatkuva kasvu	Säästö	Pysähdys	Muutos
Konvertteriteräksen tuotanto	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti	Lievää kasvua	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti	Laskee 2020 jälkeen
Jaloteräksen tuotanto	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti	Tuntuva kasvu	Kasvaa 2020 jälkeen	Nykyinen kapasiteetti	Kasvaa 2030 jälkeen
Sähköteräksen tuotanto	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti	Kasvua 2030 jälkeen	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti	Kasvua
Ferrokromin tuotanto	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti	Lisälaajennus noin 2030	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti	Nykyinen kapasiteetti
Muiden perusmetallien tuotanto	Hidas kasvu	Hidas kasvu	Tuntuvaa kasvua vuoteen 2030	Hidas kasvu	Hidas kasvu	Kääntyy laskuun 2030
Prosessiteknologian kehitys	Tavanomainen	Tavanomainen	Uutta teknologiaa	Nopeampi tehostuminen	Tavanomainen	Uutta teknologiaa, vetypelkistys
CCS-mahdollisuus (konvertteriteräs)	Ei	Pesuri	Pesuri, Happimasuuni	Pesuri	Pesuri	Ei
Biohiilen injektio masuuniin	Ei	Valinnainen CCS:n kanssa	Valinnainen CCS:n kanssa	Valinnainen CCS:n kanssa	Valinnainen CCS:n kanssa	Ei

Konvertteriteräksen valmistuksessa tarvittavan raakaraudan tuotantoon käytetään masuuniprosessia. Raakaraudan pelkistykseen tarvittavien polttoaineiden käyttöä voitaisiin periaatteessa vähentää korvaamalla osa konvertterin raakaraudasta sähköuunissa sulatetulla romuraudalla.

Pidemmällä tähtäimellä prosessin energiankulutusta voitaisiin parantaa muun muassa lisäämällä hiilen injektointia, korvaamalla masuunit sulapelkistysprosessilla (esim. Corex, Finex, CCF) tai masuunikaasun kierrättämiseen perustuvilla happimasauneilla. Sulapelkistysprosessit ovat jo nykyisin kaupallista tekniikkaa ja mukana skenaariotarkastelussa, mutta happimasaunin odotetaan kaupallistuvan vasta 2020-luvulla. Happimasauni on vähähiiliskenaarioiden kannalta varsin lupaava teknologiavaihtoehto, sillä se tekee hiilidioksidin talteenoton liittämisen prosessiin huomattavasti helpommaksi ja edullisemmaksi. Prosessi otettiin laskentamallissa tarkasteluun nopeaan tekniseen kehitykseen perustuvassa Jatkuva kasvu -skenaariossa. Myös siirtyminen suorapelkistykseen on periaatteessa mahdollista, ja sitä on tarkasteltu Muutos-skenaariossa.

Muiden perusmetallien valmistuksen energian kulutus painottuu terästeollisuutta voimakkaammin sähköön, joten toimialan suorat päästöt ovat huomattavasti terästeollisuutta pienemmät. Keskeisimmät oletukset ovat siten tuotannon volyymien kehitysarviot. Suomessa sähköön kulutuksen kannalta merkittäviä ovat erityisesti sinkin, kuparin ja nikkelin valmistus. Muiden metallien valmistuksen sähköön kokonaiskäyttö on ollut noin 2 TWh vuodessa. Tuotantovolyymien kehitystä koskevat oletukset on kuvattu taulukossa 6.



Kuva 6. Suomen terästeollisuuden tuotannon oletettu kehitys skenaarioissa.

3.6 Kaivannaisteollisuus

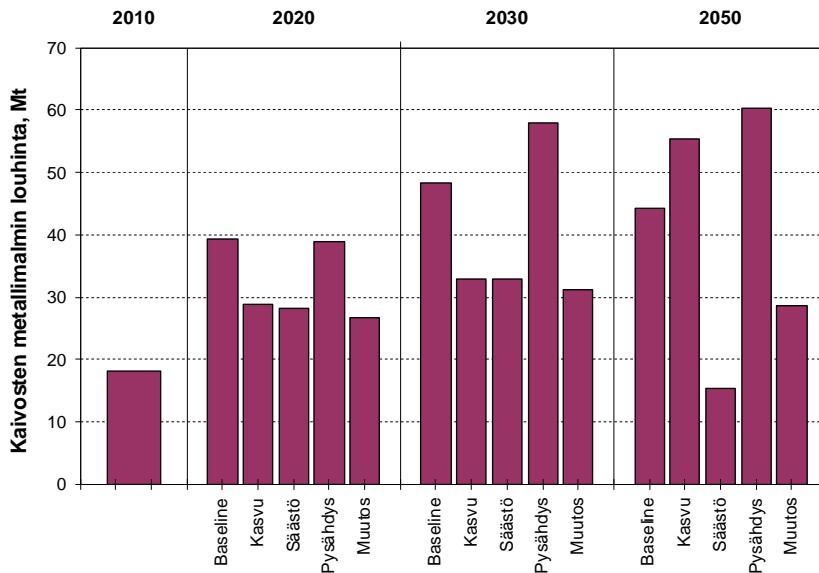
Kaivostoiminnan kehityspolut muodostettiin arvioimalla, miten kaivostoiminta reagoisi skenaarioiden yleisissä kehityspoluissa oletettuihin muutoksiin taloudessa ja politiikassa. Kaikissa kehityspoluissa otettiin huomioon kaivostoiminnan tämänhetkinen sekä lähitulevaisuuden todennäköisin kehitystilanne Suomessa. Koska kaivostoiminta on voimakkaasti sidoksissa kansainvälisen taloustilanteen ja mineraalimarkkinoiden kehittymiseen, muutokset Suomessa tai edes EU:ssa eivät välttämättä vaikuta kaivosteollisuuteen merkittävästi, ellei vastaavia muutoksia ilmene myös globaalilla tasolla. Kehitysarviot laadittiin GTK:ssa Suomen kaivostoiminnan mallin avulla (Tuusjärvi et al. 2013, Kihlman et al. 2014).

Kansainvälisten markkinoiden vaikutukset näkyvät erityisen hyvin Pysähdys-skenaariossa, jossa on oletettu raaka-ainesaannin hiipuminen kansainvälisiltä markkinoilta. Luonnonsuojelualueilla sijaitsevien esiintymien hyödyntämispotentiaalia pyrittiin heijastamaan skenaarioissa siten, että korkeiden ympäristöarvojen vallitessa (erityisesti Muutos ja Jatkuva kasvu) louhinta tapahtuisi näillä alueilla lähtökohtaisesti vain maanalaisena louhintana. Näissä tapauksissa hankkeiden toteutumisaikatauluun on myös oletettu viivästyksiä.

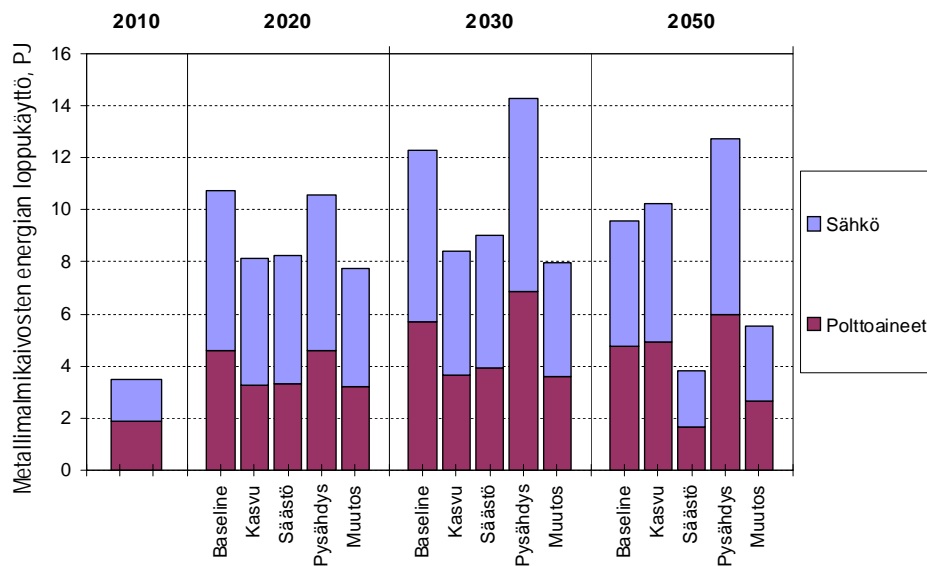
Kaivostoiminnan kehityksen perusura noudattaa hallituksen energia- ja ilmastostrategian perusuraa vuoteen 2025, josta eteenpäin kehitys on ekstrapoloitu tunnettujen hyödynnettävissä olevien malmiesiintymien pohjalta (ks. TEM 2013). Kaikki muut kehityspolut rakennettiin Baseline-skenaarion pohjalta, joitakin keskeisiä elementtejä varioiden. Oletusten mukainen kaivostoiminnan volyymin sekä sen perusteella arvioidun energian loppukulutuksen kehitys on esitetty kuvissa 7 ja 8. Jatkuva kasvu -skenaariossa kaivostoiminta kasvaa nopeasti, mutta tuotanto kohdistuu perusmetallien sijasta entistä enemmän kriittisiin metalleihin. Säästö-skenaariossa kaivostoiminta taantuu perusmetallien osalta, mutta kultaa ja uraania sisältävien esiintymien hyödyntäminen tehostuu. Pysähdys-skenaariossa oletettiin, että paine tuottaa perusteollisuuden raaka-aineita EU:n sisämarkkina-alueelta kasvaa, minkä oletettiin näkyvän kasvuna Suomen kaivostoiminnassa erityisesti perusmetallien osalta.

Talvivaaran kaivos on Suomen muihin kaivoksiin verrattuna louhintamäärältään suuri ja sitä koskevat oletukset vaikuttavat merkittävästi skenaarioiden tuloksiin. Talvivaaran kaivostoiminnan oletettiin jatkuvan kasvavana Base-, Base-80- ja Pysähdys-skenaarioissa, mikä heijastaa perusmetallien kysynnän kasvua ja perinteisiä arvoja. Kuten edellä mainittiin, Pysähdys-skenaariossa taustalla olivat kansainvälisen kaupan esteet, jonka vuoksi Talvivaaran tuotannon oletettiin kasvavan. Kaivostoiminnan oletettiin loppuvan joko pysyvästi tai tilapäisesti Muutos, Säästö ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa, mikä puolestaan heijastaa näissä skenaarioissa oletettua perusmetallien kysynnän heikkenemistä ja korkeita ympäristöarvoja. Jatkuva kasvu -skenaariossa Talvivaaran kaivos oletettiin kuitenkin suljettavan

vain tilapäisesti, ja myöhemmin teknologian kypsyttyä kaivos käynnistettäisiin uudelleen noin vuonna 2035, hypoteettisella clean tech -menetelmällä.



Kuva 7. Metallikaivostoiminnan malminlouhinnan volyymin oletettu kehitys.



Kuva 8. Metallikaivostoiminnan energian loppukulutuksen arvioitu kehitys.

3.7 Muu teollisuus ja polttoaineiden jalostus

Muu teollisuus jakaantuu käytetyssä järjestelmämallissa seuraaviin toimialoihin:

- Polttoaineiden jalostus (öljy- ja kivihiilituotteiden valmistus)
- Kemikaalien ja kemiallisten tuotteiden valmistus
- Rakennusaineteollisuus
- Elintarviketeollisuus
- Metallituote- ja konepajateollisuus sekä sähkö- ja elektroniikkateollisuus
- Kulkuneuvojen valmistus
- Muu teollisuus
- Rakennustoiminta.

Näistä toimialoista polttoaineiden jalostus on kuvattu mallissa kokonaan tuotanto-prosesseittain (esim. öljynjalostus, kivihiilen koksaus, biodieselin ja bioetanolin valmistus), ja myös kemian teollisuuden ja rakennusaineteollisuuden keskeisimpien energiaintensiivisten tuotantoprosessien teknologiat on erikseen kuvattu. Näitä prosesseja ovat olefiinien ja aromaattisten yhdisteiden, ammoniakkin, kloorin ja typpihapon valmistus kemian teollisuudessa sekä sementin, kalkin ja lasin valmistus rakennusaineteollisuudessa.

Muilta osin muun teollisuuden toimialat on kuvattu pääosin geneeristen energian loppukäyttökohteiden pohjalta. Loppukäyttö on jaettu prosessihöyryn käyttöön, muun prosessilämmön käyttöön, moottorikäyttöihin, muun prosessisähkön käyttöön, muuhun laitesähkön käyttöön sekä teollisuusrakennusten lämmitykseen.

Kaikkien näiden muun teollisuuden toimialojen osalta skenaarioissa on varioitu toimialojen tuotannon volyymejä sekä jossain määrin volyyymiin verrannollisten loppukäyttöjen ominaiskulutusten kehitystä. Muilta osin työssä ei ollut mahdollista hahmotella tarkemmin toimialojen mahdollisia kehityspolkuja, eli skenaarioissa niille oletettiin käytännössä nykyisen kaltaiset teollisuustuotteet.

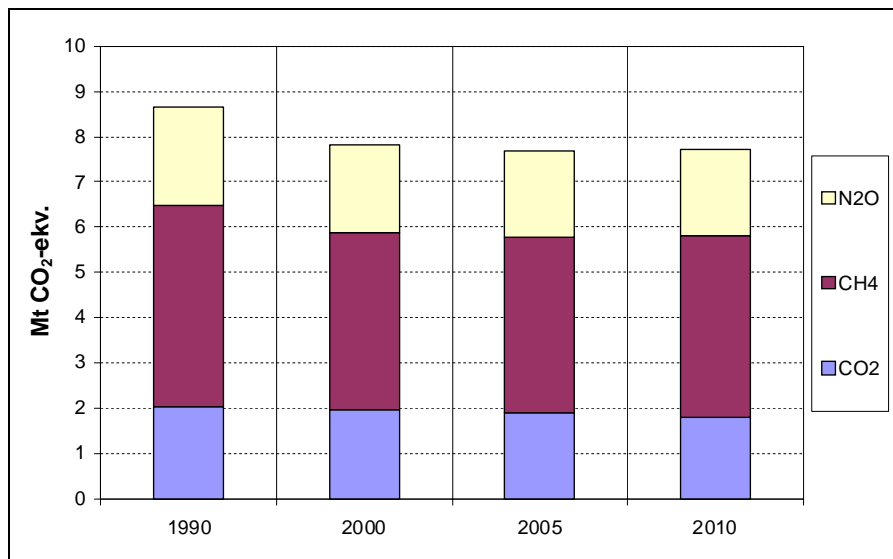
Joillakin muun teollisuuden toimialoilla CCS voi kaupallistuessaan tulla merkittäväksi päästöjen vähennyskeinoksi. Öljynjalostuksen yhteydessä tuotetaan vetyä ns. höyryreformointiprosessilla, joka tuottaa lähes puhdasta, helposti talteenotettavaa hiilidioksidia. Tämä hiilidioksidi otetaan jo nykyään talteen ja myydään eteenpäin prosessi- yms. teollisuuskaasuksi. Myös biodieselin ja biobensiinin valmistuksessa FT-prosessilla saadaan sivutuotteena pienin lisäkustannuksin talteenotettavissa olevaa hiilidioksidia. Muussa teollisuudessa CCS voi Suomessa tulla kyseeseen lähinnä sementin valmistuksessa, jonka prosessikuvauksissa on mukana hiilidioksidin talteenoton sisältävä teknologiavaihtoehto.

3.8 Maatalous

Maatalouden osuus Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä oli noin 12 % vuonna 1990 ja noin 10 % vuonna 2010. Suurin osa päästöistä on ei-energiaperäisiä metaani- ja dityppioksidipäästöjä. Päästöjen jakautuminen kaasuittain on esitetty kuvassa 9.

Hiilidioksidipäästöt ovat päästöinventaarion mukaan kokonaan polttoaineperäisiä, ja niiden osuus maatalouden päästöistä on noin 25 %. Metaanin osuus on noin 50 % ja dityppioksidin osuudeksi jää 25 %. Metaanipäästöistä suurin osa, yli 80 %, syntyy kotieläinten ruoansulatuksessa, ja loput lannankäsittelyssä, maatalousjätteen poltossa ja polttoaineiden poltossa. Dityppioksidipäästöjen suurimmat lähteet ovat orgaaniset turvemaat (33 %), keinolannoitus (23 %), typen huuhtouma (12 %) ja lannan levitys (9 %) (Tilastokeskus 2013).

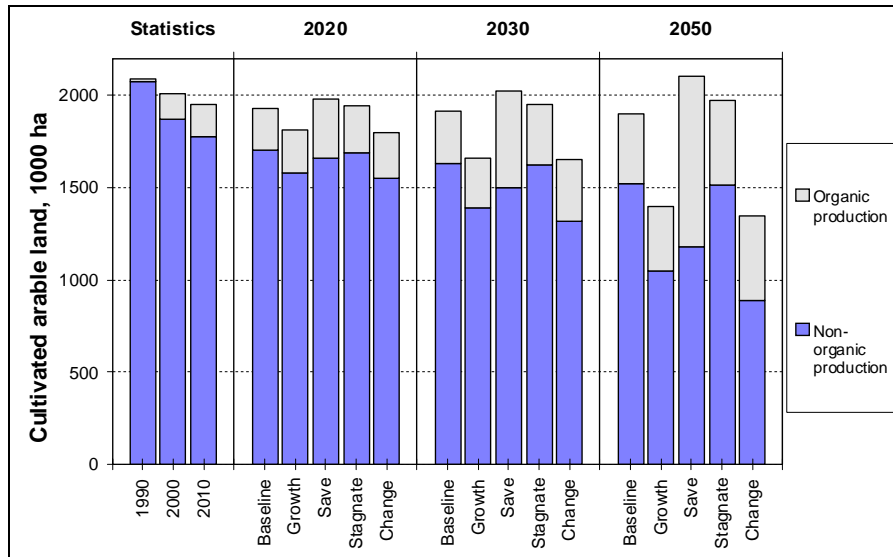
Kun maatalouden päästöt olivat vuonna 2010 noin 11 % vuoden 1990 päästöihin verrattuna, on ilmeistä, että pyrittäessä jopa 80–90 %:n vähennyksiin Suomen kokonaispäästöissä myös maatalouden päästöjen vähentämismahdollisuudet on otettava huomioon. Skenaariotarkastelussa käytettiin maatalouden kehityksestä ja päästöjen vähennyspotentiaalista kussakin skenaariossa hieman erilaisia oletuksia. Baseline-skenaarion mukainen viljellyn peltoalan ja kotieläinkannan kehitys vastaa kohtuullisen hyvin MTT:n julkaisemaa perusarviota (Regina et al. 2014). Keskeisten oletusten eroavaisuudet on koottu taulukkoon 7.



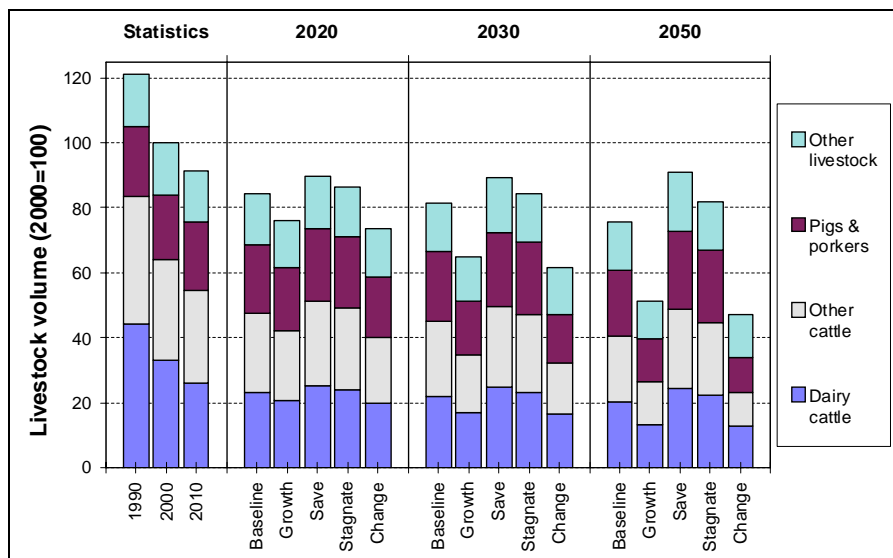
Kuva 9. Suomen maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen jakauma vuosina 1990, 2000, 2005 ja 2012.

Taulukko 7. Maatalouden kehitystä koskevat keskeisimmät skenaario-oletukset.

Kohde \ skenaario	Baseline / Base-80%	Jatkuva kasvu	Säästö	Pysähdys	Muutos
Viljelty peltoala	Vähenee (-2 %)	Vähenee (-28 %)	Kasvaa (+8 %)	Kasvaa (+1 %)	Vähenee (-31 %)
Luomutuotannon max. osuus peltoalasta	Varovainen (max. 20 %)	Kohtalainen (max. 25 %)	Suuri (max. 45 %)	Kohtalainen (max. 25 %)	Melko suuri (max. 35 %)
Lannoituksen päästöjen vähennyspotentiaali	Konventionaalinen kehitys	Täsmälannoitus ja ravinteiden kierrätys lisäävät	Konventionaalinen kehitys	Konventionaalinen kehitys	Täsmälannoitus ja ravinteiden kierrätys lisäävät
Turvemaiden osuus viljelyalasta	Vakio	Vakio	Vakio	Vakio	Vakio
Nautakarjan määrä	Vähenee (-26 %)	Vähenee (-50 %)	Vähenee (-11 %)	Vähenee (-18 %)	Vähenee (-57 %)
Sikakarjan määrä	Vähenee (-4 %)	Vähenee (-36 %)	Kasvaa (+15 %)	Vähenee (-5 %)	Vähenee (-49 %)
Siipikarjan määrä	Vähenee (-4 %)	Vähenee (-25 %)	Kasvaa (+14 %)	Vähenee (-4 %)	Vähenee (-15 %)
Ruoansulatuksen päästöjen vähennyspotentiaali	Konventionaalinen kehitys	Ravinnon ja mikrobikannan kehitys lisäävät	Konventionaalinen kehitys	Konventionaalinen kehitys	Ravinnon ja mikrobikannan kehitys lisäävät
Biokaasutuksen osuus lannankäsittelyssä	Kustannustehokkuuden mukaan	Kustannustehokkuuden mukaan	Kustannustehokkuuden mukaan	Kustannustehokkuuden mukaan	Kustannustehokkuuden mukaan



Kuva 10. Maatalouden viljellyn peltoalan oletettu kehitys skenaarioissa vuosina 1990–2050.



Kuva 11. Maatalouden kotieläinmäärien oletettu kehitys skenaarioissa vuosina 1990–2050.

Skenaariotarinoiden linjausten mukaisesti sekä viljellyn peltopinta-alan että kotieläinkannan oletetaan vähenevän merkittävästi Jatkuva kasvu ja Muutos-skenaarioissa, joissa kansainvälisen kaupan ja työnjaon oletetaan tehostuvan. Toisena ääripäänä on Säästö-skenaario, jossa pyritään säilyttämään ruoantuotannon omavaraisuus. Ruoantuotantoon käytetyn peltoalan oletetut muutokset heijastuvat skenaarioissa automaattisesti myös peltobiomassan tuotantopotentiaaliin. Muodostettuja maatalouden tuotantoskenaarioita on havainnollistettu kuvissa 10 ja 11. Laskentamallissa kuvattujen skenaarioiden puutteena voidaan pitää sitä, että niissä ei ole arvioitu tuotannon tuottavuuden kasvua, joka kasvattaa muun muassa kotieläintä kohti laskettuja päästöjä.

Laskentamallissa on kuvattu maatalouden päästöjen vähentämiskeinoina seuraavat teknologiavaihtoehdot:

- Karjan ruokintamuutokset (tehostettuna Jatkuva kasvu -skenaariossa)
- Karjan ruoansulatuksen mikrobikannan kehittäminen (Jatkuva kasvu)
- Typpilannoituksen tarkentaminen (tehostettuna Jatkuva kasvu -skenaariossa)
- Nitrifikaatioinhibiittoreiden käyttö
- Biokaasutuksen lisääntyminen
- Luomuviljelyn lisääminen (kussakin skenaariossa oletettuun maksimirajaan saakka).

Esimerkiksi FAO on arvioinut, että luomuviljely voi vähentää maatalouden päästöjä noin 20 %, josta 10 % suorien N₂O-päästöjen vähenemänä ja 10 % välillisten päästöjen vähenemänä, ja lisäksi hiilen sitoutuminen maaperään kasvaa (Scialabba & Müller-Lindenlauf 2010). Toistaiseksi luomuviljelyn vaikutuksia päästöihin ei kuitenkaan ole tutkittu riittävästi, joten arviot sisältävät väistämättä huomattavia epävarmuuksia. Laskelmissa on otettu huomioon vain suorat päästövaikutukset.

3.9 Energiantuotanto

Bioenergian tuotanto

Puuperäisen bioenergian lähteet voidaan jakaa seuraaviin komponentteihin:

- Sellunvalmistuksessa syntyvä mustalipeä
- Teollisuuden puutähteet (kuori, sahanpuru, puutähdehake ym.)
- Muut metsäteollisuuden sivu- ja jätetuotteet (mänty- ja koivuöljy, biolietteet ym.)
- Metsähake (pienpuu, oksat, latvat, kannot)
- Energiakäyttöön menevä kuitupuu
- Pienpolttopuu (halot, klapit, pilkkeet)
- Kierrätyspuu
- Tuontipuu

Metsäteollisuuden sivutuotteet muodostavat nykyisin suurimman osan energiapuun lähteistä, ja niiden määrä on lähes suoraan riippuvainen metsäteollisuuden tuotannosta. Myös käytetyssä laskentamallissa niiden tuotanto on mallinnettu verrannolliseksi metsäteollisuuden eri tuotantoprosessien volyyymiin, joten eri skenaarioissa käytettävissä olevan sivutuotteiden määrä juontuu metsäteollisuuden tuotannon kehitystä koskevista oletuksista (ks. Kallio 2014).

Myös metsähakkeen tuotantopotentiaali riippuu vahvasti metsäteollisuuden tuotannosta, sillä sen tuotanto tapahtuu harvennus- ja päätehakkuiden yhteydessä. Laskentamallissa metsähakkeen kunkin jakeen tuotantomahdollisuudet onkin mallinnettu verrannolliseksi nimenomaan runkopuun kokonaiskäyttöön. Enimmäispotentiaalin kehitys on kalibroitu siten, että se ylittää vuonna 2020 jonkin verran metsähakkeen kokonaiskäytölle tavoitteeksi asetettuun 25 TWh:n määrän, ja sen jälkeen runkopuun käyttöön suhteutetun enimmäistuotantopotentiaalin on oletettu vielä kasvavan hitaasti, siten että enimmäispotentiaali on noin 33 TWh vuonna 2050. Oletukset ovat näiltä osin sopusoinnussa esimerkiksi Metsätehon ja Pöyryn arvioiden kanssa (TEM 2010), mutta niitä on tarkoituksellisesti pidetty verraten varovaisina erityisesti kantojen osalta, sillä kantojen hyödyntäminen on hiilitaseiden kannalta varsin epäedullinen metsähakkeen jae. Teknis-ekologinen maksimipotentiaali on Pöyryn ja Metsätehon muutaman vuoden takaisessa selvityksessä arvioitu 30,7 TWh:ksi, ja kun siihen lisätään kantojen potentiaalia varovaiset 2,5 TWh (vain hieman nykytasoa enemmän), päästään skenaarioiden mukaiseen enimmäismäärään vuonna 2050.

Kuitupuun käyttö energiaksi joko suoraan polttoaineena tai biojalostamoissa on laskentamallissa rajoitettu korkeintaan kuitupuuksi käytettävissä olevan sahakkeen määrään, joten sen enimmäispotentiaali on siis käytännössä oletettu verrannolliseksi mekaanisen metsäteollisuuden tuotantovolyymin kehitykseen. Pienpolttopuun tuotantopotentiaalin on laskentamallissa oletettu pysyvän suunnilleen vakiona, vajaan 60 PJ:n määrässä. Energiapuun tuonnin on oletettu olevan korkeintaan 3 TWh, josta enintään 2 TWh laivakuljetuksina rannikon monipolttoainekattiloihin.

Peltobiomassan tuotantopotentiaalit on skenaarioissa arvioitu MTT:n maatalouden sivutuose selvitysten pohjalta, mutta käyttäen konservatiivisia arvioita ruokavalioiden kehityksestä (sekaruokavalio vallitsevana) ja bioenergian hehtaarisuhteesta (Pahkala & Lötjönen 2012). Skenaarioissa tuotantopotentiaalit kytkettiin myös peltoalan kokonaiskäyttöön (ks. luku 3.8) siten, että ruoantuotantoon tarvittavan peltoalan määrän vähentyessä sitä voidaan hyödyntää enemmän bioenergian tuotantoon ja päinvastoin. Energiakasvien tuotantopotentiaalin vaihteluväli on siten skenaarioissa 20–60 PJ vuonna 2050. Sivutuotteiden potentiaaliksi on oletettu MTT:n arvion mukaisesti kaikissa skenaarioissa 12 PJ (3,4 TWh) vuonna 2050.

Ydinvoima

Suomessa oli vuonna 2014 neljä toiminnassa olevaa ydinvoimalaitosta, Loviisa 1 ja 2 sekä Olkiluoto 1 ja 2. Laitosten kokonaisteho on 2750 MW ja vuotuinen kokonaistuotanto on vastannut keskimäärin 26 % sähkön kokonaishankinnasta. Viides voimalaitos, Olkiluoto 3, on rakenteilla, ja sen arvioidaan tulevan tuotantoon noin vuonna 2017. Tällöin ydinvoimalaitosten yhteenlaskettu teho nousee 4350 MW:iin. LCFinPlat-hankkeen aikana vireillä oli lisäksi kahden uuden voimalaitoksen rakennushankkeet. Kyseessä olevat uudet voimalaitokset ovat Fennovoima Oy:n suunnittelema Hanhikivi 1 -voimalaitos (1200 MW) sekä Teollisuuden Voima Oy:n suunnittelema Olkiluoto 4 -voimalaitos (1400–1600 MW).

Tämän vuoksi tarkastelluista skenaarioissa Baseline- ja Base-80%-skenaarioissa oletetaan kummankin vireillä olevan ydinvoimalaitoshankkeen toteutuvan päivitetyin energia- ja ilmastostrategian mukaisesti (TEM 2013) siten, että laitosten käyttö alkaa vuosina 2024–2028. Näiden jälkeen uutta ydinvoimaa voidaan rakentaa vielä sen jälkeenkin, mikäli se on kannattavaa, siten että maksimikapasiteetti on 6550 MW vuonna 2050. Muissa tarkastelluissa skenaarioissa vireillä olleiden voimalaitoshankkeiden toteutumista ei pidetä annettuna, vaan laskentamalli ratkaisee investointien toteutumisen hankkeiden kannattavuuden perusteella. Muutos-skenaariossa oletetaan, että mikään uusista ydinvoimalaitoshankkeista ei toteudu. Yhteenveto ydinvoiman lisärakentamista koskevista oletuksista on esitetty taulukossa 8.

Vesivoima

Vesivoiman olemassa olevan tuotantokapasiteetin on oletettu pysyvän käytössä koko tarkasteluhorisontin ajan. Uuden vesivoiman rakentamispotentiaalia on Suomessa edelleen, mutta taloudellisesti kannattaviksi arvioitujen kohteiden potentiaali on verraten pieni (Vesirakentaja 2008). Näiden lisäksi laskentamallissa on oletettu myös minivesivoiman lisärakentamispotentiaalia, mutta se tulee kilpailukykyiseksi vasta sähkön hinnan noustessa riittävästi. Kannattavan lisärakentamiskohteiden hyödyntämisen myötä kokonaistuotantopotentiaalin on oletettu olevan nousevan vajaaseen 15 TWh:iin ja heikommin kannattavan minivesivoiman lisäpotentiaalin kanssa noin 16 TWh:n enimmäispotentiaaliin vuonna 2050.

Tuulivoima

Skenaarioissa tuulivoiman rakennettavissa olevaksi kokonaispotentiaaliksi on oletettu noin 13 GW vuoteen 2050 mennessä, josta noin 3,5 GW maa- ja rannikotuulivoimaa, noin 3,5 GW lähellä rannikkoa olevaa tuulivoimaa ja noin 6 GW varsinaista offshore-merituulivoimaa. Tuotantopotentiaalina tämä vastaa lähes 40 TWh vuoteen 2050 mennessä. Vuoteen 2100 mennessä rakennettavissa olisi oletusten mukaan kuitenkin vielä suunnilleen saman verran lisäkapasiteettia.

Tuulivoiman tuotantopotentiaali Suomessa on laskentamallissa jaettu laskentamallissa kymmeneen eri luokkaan. Tuulivoiman kokonaistuotannon lisäystahdille ei mallissa ole käytännössä muuta rajoitusta kuin näiden eri tuuliluokkien potentiaalit sekä reservikapasiteetin lisätarpeen aiheuttamat lisäkustannukset. Koska nykyisen syöttötariffin mekanismia ei voida laskentamallissa kuvata oikein, sen sijasta mallissa on oletettu tuulivoiman vähimmäistuotannoksi vuonna 2020 tavoitteiden mukaiset 6 TWh. Vuoteen 2050 mennessä tuotannon on nouseva skenaariosta riippuen vähintään 7–12 TWh:iin, ja enimmäismääränä on ainoastaan oletettu maksimipotentiaali. Nopean teknisen kehityksen skenaarioissa (Jatkuva kasvu, Muutos) on oletettu optimistiset arviot tuulivoimateknologian kustannusten ja käyttökertoimien kehityksestä, kun muissa skenaarioissa on käytetty perusarvioita.

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on luonteeltaan perustuotantoa, jonka määrää ei voi ohjata vapaasti. Yhteistuotannon määrä on pääosin sidottu kaukolämmön ja teollisuuden prosessihöyryn tarpeeseen, mutta suurissa asutuskeskuksissa myös jossain määrin kaukojäähdytyksen kulutukseen. Laskentamallissa Suomen kaukolämmön kysyntä on jaettu alueellisesti yhdyskuntien koon ja energialähteiden saatavuuden mukaan erityyppisiin kaukolämpöverkkoihin, joiden yhteistuotantokapasiteettia voidaan lisätä investoimalla kokoluokaltaan ja polttoainehuolloltaan kullekin alueelle ominaisiin laitostyypeihin.

Investoinnit uuteen yhteistuotantokapasiteettiin määräytyvät mallissa varsin vapaasti taloudellisin perustein niin yhdyskuntien tuotannossa kuin teollisuudessa. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto voi siten kussakin skenaariossa laajentua tai supistua sen kilpailukyvyn mukaan. Myös kaukolämpöverkoston investoinnit on otettu mallissa huomioon, mutta olemassa olevien verkostojen on oletettu vanhenevan varsin hitaasti, jolloin yhteistuotannon tason säilyttäminen vuoteen ei edellytä suuria investointeja verkoston uusimiseen ennen vuotta 2040.

Koska rakennusten energiatehokkuus paranee ja teollisuuden prosessit sähköistyvät, yhteistuotannon taso voidaan ylläpitää vain tuotannon rakennussuhdetta (sähkön ja lämmöntuotannon suhde) kasvattamalla. Laskentamalli sisältääkin monia rakennussuhteeltaan korkeita teknologiavaihtoehtoja, kuten integroidut kaasutuskombivoimatekniikat, superkriittinen kattilatekniikka ja polttokennotekniikka. Myös CCS:n soveltamisen kannalta lupaava happipolttotekniikka on otettu mallissa tekniikkavaihtoehtona huomioon.

Nykyisenkaltaisten kaukolämpöverkostojen ohella Jatkuva kasvu ja Muutos -skenaarioissa on tarkasteltu myös matalalämpöteknikkaa, jossa kaukolämpöveden lämpötilat ja paine-erot ovat tavanomaista kaukolämpöä matalampia. Matalalämpöteknikan oletetaan voivan tulla käyttöön asteittain vuodesta 2030 lähtien, ilman merkittäviä investointeja kiinteistöjen lämmönjakojärjestelmien uusimiseen.

Tekniikan ansiosta kaukolämmön tuotannon ja jakelun tekniikkaa voitaisiin tehostaa, sillä se mahdollistaa tuotannon rakennussuhteen noston ja jakeluhäviöiden pienentämisen.

Aurinkosähkö ja -kaukolämpö

Auringosta saatavan säteilyenergian määrä ei ole Suomessa merkittävästi pienempi kuin muualla Euroopassa, mutta se painottuu huomattavasti voimakkaammin kevät- ja kesäkauteen. Kun lähes samaan aikaan vesivoiman tuotanto ja vesivarastojen taso ovat suurimmillaan ja kulutus on kesällä pienimmillään, aurinkosähkön tuotannon saaminen kilpailukykyiseksi on verrattain haastavaa Suomen olosuhteissa.

Aurinkoenergiajärjestelmien kehitys osalta on ollut viime vuosina nopeaa, ja investointikustannukset ovat alentuneet merkittävästi. Kaikissa skenaarioissa on oletettu aurinkokennojärjestelmien kustannusten alenevan edelleen merkittävästi vuoteen 2050 mennessä. Kun laitoskokoluokan järjestelmien investointikustannukset olivat vuonna 2012 keskimäärin 2000–3000 €/kW (2500–4000 USD/kW, esim. Irena 2013, IEA 2013), perusarvion mukaan kustannukset ovat vuonna 2050 yli 70 % pienemmät, noin 600 €/kW. Nopean teknologisen kehityksen skenaarioissa (Jatkuva kasvu, Muutos) oletetaan vielä tätä huomattavasti edullisempi kustannuskehitys. Koko aurinkokennojärjestelmän kustannusten oletetaan tällöin alenevan tasolle 250 €/kW vuonna 2050, mikä vastaa noin 90 % kustannusten laskua vuoteen 2010 verrattuna. Samalla järjestelmien teknisen käyttöiän oletetaan pidentyvän 40 vuoteen, kun se on vielä nykyisin arviolta 25 vuotta.

Muutos-skenaariossa on lisäksi oletettu ohutkalvotekniikkaan perustuvien aurinkopaneelien kaupallistumisen laajentavan aurinkosähkön taloudellista tuotantopotentiaalia huomattavasti myös Suomen olosuhteissa. Kun muissa skenaarioissa on oletettu aiempien arvioiden mukaisesti edullisimman tuotantopotentiaalin rajoitettavan Suomessa noin 5 TWh:n määrään (Pasonen et al. 2012), Muutos-skenaariossa potentiaalin on oletettu olevan noin kolminkertainen. Koska suuri kesäaikaan painottuva vaihteleva tuotanto edellyttää käytännössä myös sähkön varastoinnin kehitystä, Muutos-skenaariossa on oletettu uusien varastointitekniikoiden läpimurto, joka on mallinnettu superkondensaattoreihin perustuvana.

Hiilidioksidin talteenotto

Vaikka Suomen alueelta ei ole ainakaan toistaiseksi löydetty sopivaa laajamittaiseen hiilidioksidin loppusijoitukseen soveltuvaa maankamaraa, hiilidioksidin talteenotto saattaa silti tulla varteenotettavaksi päästöjen vähennyskeinoksi myös Suomessa, sillä hiilidioksidin kuljetus esimerkiksi Pohjan- tai Barentsinmerellä sijaitseviin loppusijoituspaikkoihin olisi teknisesti täysin mahdollista.

Laskentamallissa on kuvattu hiilidioksidin talteenoton edellyttämien kuljetusten ja loppusijoituksen kustannukset VTT:ssä tehdyn selvityksen pohjalta (Teir et al. 2011). Energian tuotannossa hiilidioksidin talteenotto on otettu huomioon vain uusissa laitoksissa. Uusissa laitoksissa talteenoton aiheuttamat vaikutukset kustannuksiin ja energiatehokkuuteen ovat pienempiä kuin vanhojen laitosten uusimisen yhteydessä, mutta vastaavasti talteenoton kaupallinen potentiaali jää aluksi pienemmäksi. Toisaalta hiilidioksidin talteenottoa ei ole vielä kaupallisessa mitassa riittävästi demonstroitu ja lisäksi epävarmuus tulevaisuuden päästövähennystavoitteista heikentää CCS:n nopean kaupallistumisen näkymiä.

Edullisimmat hiilidioksidin talteenoton sovelluskohteet ovat tuotantolaitoksissa, joissa syntyy suuria määriä verraten puhdasta hiilidioksidia. Tällaisia tekniikoita ovat muun muassa synteesikaasun tuotantoon perustuvat biojalostamot ja happipolttoon tai kiinteäoksidipolttokennoihin perustuvat voimalaitokset. Myös tavantomaisten voimalaitosten savukaasuista voidaan erottaa hiilidioksidi, mutta se johtaa laitoksen kokonaishyötysuhteen merkittävään heikentymiseen. VTT:n selvitysten mukaan (Teir et al. 2011) hiilidioksidin erotuksen integrointi yhdistettyyn sähkön ja lämmöntuotantoon parantaisi kuitenkin energiatasetta, sillä erotuksen käyttämät energiavirrat voidaan paremmin integroida CHP-laitokseen ja siten tuotannon hyötysuhteen alenema on pienempi kuin esimerkiksi lauhdevoimalaitoksissa. Kuljetuskustannusten kannalta talteenotolla varustettujen laitosten edullisin sijaintipaikka on rannikolla. Laskentamallissa on kuvattu monia eri hiilidioksidin talteenotolla varustettuja voimalaitostekniikoita, joiden teknis-taloudelliset parametrit perustuvat sekä kansainvälisiin tietolähteisiin että VTT:n omiin selvityksiin.

Sähkön varastointi

Energiantuotantoon liittyy läheisesti myös energian varastointi, jonka merkityksen voidaan arvioida kasvavan vähähiilisessä tulevaisuuden energijärjestelmässä. Erityisesti sähkön varastointi voi tulla keskeiseksi keinoksi, jonka avulla suuretkin määrät vaihtelevaa, uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa sähköntuotantoa voidaan integroida energijärjestelmään. Pohjoismaissa on perinteisesti hyödynnetty vesivarastoja sähkön varastointikeinona, mutta tarkastelluissa skenaarioissa Pohjoismaisten varastojen kapasiteettien oletettiin pysyvän verrannollisena vesivoimatuotannon kokonaismäärään. Tarkasteluissa ei otettu huomioon varsinaisen pumppuvesivoiman rakentamista Suomeen, vaikka sitäkin voitaisiin pitää mahdollisena. Sen sijaan muualla Euroopassa pumppuvesivoima säilynee laajimmin hyödynnettynä sähkön varastointitekniikkana lähitulevaisuudessa. Uusien merivesipumppuvoimalaitosten rakentamista on ehdotettu muun muassa Irlannissa.

Pumppuvesivoiman ohella muita sähkön varastointitekniikoita ovat muun muassa paineilmaparastot, vauhtipyörät, erilaiset akut, superkondensaattorit ja suprajohtavat magneettiset varastot. Näistä paineilmaparastot (CAES) ovat jo kaupallisessa käytössä, ja niiden suorituskyvyn oletetaan paranevan edelleen tulevaisuudessa. Akkuteknologiaa käytetään laajasti muun muassa mobiililaitteissa, mutta suuressa

kokoluokassa sen ongelmina ovat toistaiseksi verraten lyhyt käyttöikä ja akkujen korkeat kustannukset. Lupaavimpaa uutta teknologiaa edustavat puolestaan superkondensaattorivarastot, joiden hyötysuhteen arvioidaan nousevan 90 %:iin (esim. ETSAP 2012).

Mallitarkasteluissa mahdollisuus investoida CAES-varastoihin oli kaikissa skenaarioissa otettu huomioon. Superkondensaattorien kaupallistumisen oletettiin toteutuvan vuoteen 2040 mennessä Muutos-skenaariossa, jossa sähkön varastoinnille on erityisen suuri tarve. Teknologian investointikustannusten oletettiin skenaariosa putoavan siihen mennessä 500 USD/kW:n tasolle (ETSAP 2012). Suprajohtavat magneettiset varastot (SMES) ovat toinen lupaava tehonsäätöön sopiva tulevaisuuden varastointitekniikka, jolla on pienet häviöt, korkea energiatiheys ja erittäin lyhyt vasteaika. Koska tästä tekniikasta ei ollut kuitenkaan kustannusarviota käytettävissä, Muutos-skenaarioon valittiin superkondensaattorit edustamaan varastointitekniikan teknologiahyppäystä.

Sähkön pidemmän ajan kausivarastointiin nykytekniikoista soveltuvat vesivarastojen lisäksi ainoastaan tekniikat, joilla sähkö muunnetaan vedyksi, metaaniksi tai metanoliksi, joka varastoidaan ja muunnetaan myöhemmin takaisin sähköksi. Toistaiseksi näiden tekniikoiden taloudellisuus ja energiahyötysuhteet ovat kuitenkin liian huonot laajamittaisen kaupalliseen käyttöön. Ne voivat kuitenkin tulla kannattaviksi järjestelmissä, joissa tuuli- tai aurinkovoiman tuotanto ylittää säännöllisesti joko sähkön kysynnän tai siirtokapasiteetin. Taloudellinen hiilivetysnteesi aurinkoenergian avulla suoraan hiilidioksidista ja vedestä saattaisi tuoda aivan uudet näkömät sekä energian varastointiin että liikennepolttoaineiden tuotantoon.

Tämä hankkeen puitteissa ei ollut mahdollista tarkastella syvällisesti siirtymistä niin sanottuun vetytalouteen, metaanitalouteen tai vaikkapa aurinkotalouteen, jotka kaikki edellyttävät tiettyjen teknologioiden harppauksellista kehitystä ja käyttöönottoa ja/tai poliittista tahotilaa. Siirtymistä metaanitalouteen tutkitaan perusteellisemmin juuri käynnistyneessä Tekes-rahoitteisessa NeoCarbon-hankkeessa yhteistyössä VTT:n, Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Turun yliopiston kanssa. Vetyyn liittyviä teknologioita ja järjestelmiä on tutkittu aiemmin esimerkiksi Tekesin polttokenno-ohjelmassa.

Taulukko 8. Energiantuotannon kehitystä koskevat keskeisimmät skenaario-oletukset.

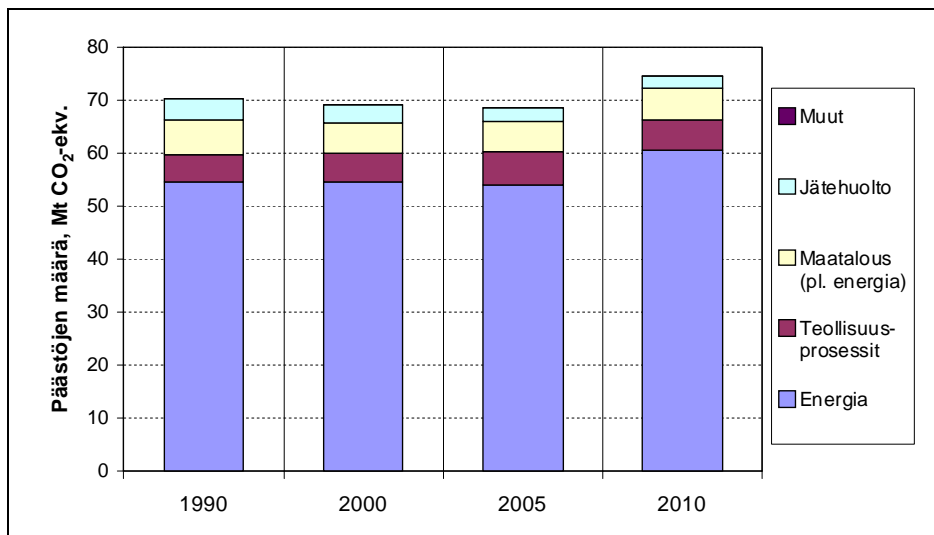
Kohde \ skenaario	Baseline / Base-80%	Jatkuva kasvu	Säästö	Pysähdys	Muutos
Ydinvoima (MW)	6600 v. 2030 max. 6550 v. 2050	max. 6600 v. 2030 max. 5200 v. 2050	max. 6600 v. 2030 max. 7000 v. 2050	max. 5050 v. 2030 max. 4300 v. 2050	3850 v. 2030 1600 v. 2050
Vesivoiman potentiaali	Max. 16 TWh vuonna 2050	Max. 16 TWh vuonna 2050	Max. 16 TWh vuonna 2050	Max. 16 TWh vuonna 2050	Max. 16 TWh vuonna 2050
Tuulivoima	Tavanomainen tekn. kehitys, väh. 7 TWh v. 2050	Nopea teknologian kehitys, väh. 12 TWh v. 2050	Tavanomainen tekn. kehitys, väh. 7 TWh v. 2050	Tavanomainen tekn. kehitys, väh. 7 TWh v. 2050	Nopea teknologian kehitys, väh. 12 TWh v. 2050
Aurinkoenergia	Tavanomainen teknologian kehitys	Nopea teknologian kehitys	Tavanomainen teknologian kehitys	Tavanomainen teknologian kehitys	Erittäin nopea kehitys, suuri potentiaali
Sähkön ja lämmön yhteistuotanto	Tavanomainen teknologian kehitys	Nopea teknologian kehitys	Tavanomainen teknologian kehitys	Tavanomainen teknologian kehitys	Nopea teknologian kehitys
Matalalämpö-kaukolämpöverkot	Ei kaupallistu	Vuodesta 2030 alkaen	Ei kaupallistu	Ei kaupallistu	Vuodesta 2030 alkaen
CCS, fossiiliset	Kaupallistuu täysimittaisesti	Kaupallistuu täysimittaisesti	Kaupallistuu täysimittaisesti	Rajoitettu potentiaali, korkeat kustannukset	Rajoitettu potentiaali, korkeat kustannukset
BECCS (bio-CCS)	Kaikki kohteet mukana	Kaikki kohteet mukana	Kaikki kohteet mukana	Vain polttoaineiden jalostuksessa	Vain polttoaineiden jalostuksessa
Sähkön varastointitekniikka	CAES	CAES (+ älykkäät verkot)	CAES	CAES	CAES, superkondensaattorit

4. Skenaariotulokset

4.1 Energian tuotanto

Energian kokonaiskulutus eli primaarienergian kulutus ja sen jakautuminen eri energialähteisiin on kasvihuonekaasupäästöjen kannalta keskeinen kehitystekijä. Kuten kuvasta 12 voidaan nähdä, viime vuosikymmeninä Suomen kasvihuonekaasujen päästöistä noin 80 % on aiheutunut energian kulutuksesta.

Laskentamallin tuottama primaarienergian kokonaiskulutus on IEA:n laskentakäytännön mukainen, ja se on esitetty kuvassa 13. Tulosten mukaan energian kokonaiskulutus nousee Baseline-skenaariossa vajaan 1700 PJ:n määrään vuonna 2030, mutta kääntyy sen jälkeen lievään laskuun. Vähähiiliskenaarioissa primaarienergian kulutus on 1160–1570 PJ vuonna 2050, jolloin se on kaikissa muissa paitsi Base-80%-skenaariossa vuoden 2010 kulutusta pienempi. Koko-

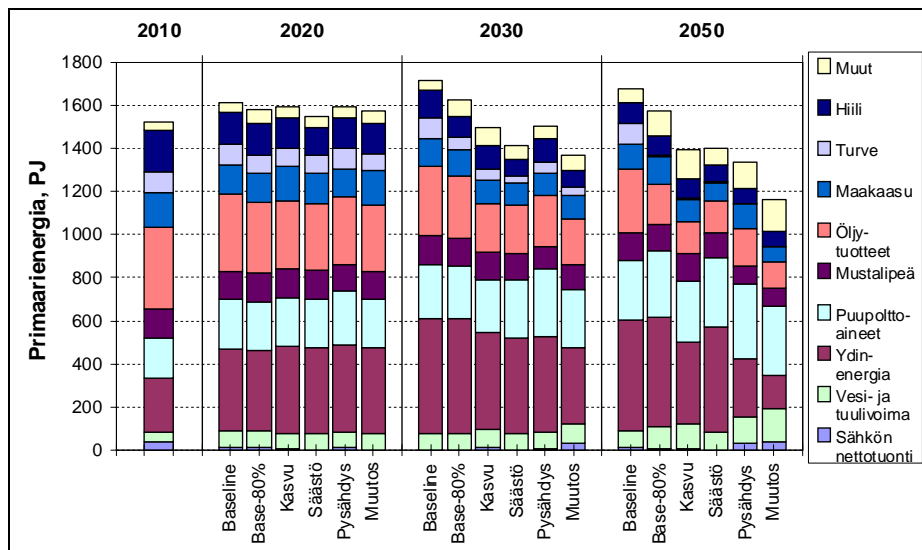


Kuva 12. Suomen kasvihuonekaasupäästöt päälähteittäin vuosina 1990–2010.

naiskulutusta tarkasteltaessa on huomattava, että ydinvoimalla on primaarienergian määrän muutoksiin tuntuva vaikutus, sillä sen keskimääräinen energiahyötysuhde jää alle 37 %:n (nykytilastoissa se on 33 %). Vaikutus näkyy hyvin Muutos-skenaariossa, jossa kokonaiskulutus vuonna 2050 on ydinvoiman vähäisen osuuden vuoksi pienin, 24 % vuoden 2010 kulutusta pienempi.

Kasvihuonekaasupäästöjen kannalta ratkaisevassa asemassa on fossiilisten polttoaineiden kulutus. Energian käytön tehostamisen ohella vähähiiliskenaarioissa pyritään joko korvaamaan fossiilisia polttoaineita muilla energialähteillä tai ottamaan niiden poltosta syntyvä hiilidioksidi talteen varastoitavaksi. Voimakkaimmin ilmastopolitiikka vaikuttaa kivihillen ja turpeen käyttöön, sillä niistä aiheutuu suurimmat KHK-päästöt energiayksikköä kohti. Toisaalta kivihillen käytön vähenemistä rajoittaa kuitenkin sen vaikea korvattavuus perusmetallien ja sementin valmistuksessa. Myös öljyn kokonaiskulutus putoaa kaikissa vähähiiliskenaarioissa vuoteen 2050 mennessä alle puoleen vuoden 2010 tasosta, mikä on muutoksena merkittävä, sillä öljy on vielä toistaiseksi tärkein energialähde. Suurin pudotus öljyn kulutukseen saavutetaan Muutos-skenaariossa, lähes 70 % vuoden 2010 tasosta.

Fossiilisten polttoaineiden korvaajina ovat uusiutuvat energialähteet ja ydinvoima. Uusiutuvien energialähteiden yhteenlaskettu osuus primaarienergiasta nousee vähähiiliskenaarioissa 40–60 %:iin vuonna 2050. Vaikka tuuli- ja aurinkovoiman määrä kasvaa osassa skenaarioista hyvinkin voimakkaasti, puuperäiset polttoaineet säilyvät silti kaikissa vähähiiliskenaarioissa Suomen tärkeimpänä uusiutuvana primaarienergiälähteenä, kuten kuvasta 14 voidaan nähdä.

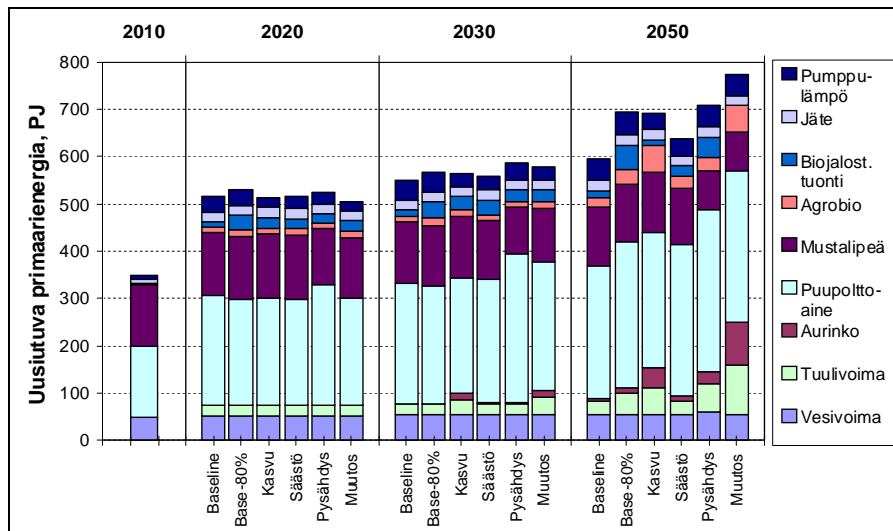


Kuva 13. Primaarienergian kokonaiskulutuksen kehitys skenaarioissa vuosina 2010–2050. ”Muut” sisältää jätteen, muun bioenergian ja aurinkoenergian.

Puuperäisen bioenergian kokonaiskäyttö kasvaa vuoteen 2050 mennessä 45–57 % vuoden 2010 tasosta, siitä huolimatta että useassa skenaariossa kemiallisen metsäteollisuuden tuotanto ja sen puun käyttöön kytkeytyvä bioenergiapotentiaali pienenee huomattavasti. Mainittakoon kuitenkin, että herkkyytstarkasteluna analysoitiin myös mahdollisten tiukentuvien bioenergian kestävyyskriteerien vaikutusta bioenergian käyttöön (ks. luku 5.1). Myös Baseline-skenaariossa puupolttoaineiden käyttö kasvaa merkittävästi, mikä johtuu osin siinä oletetusta korkeimmalla tasolla pysyvistä kemiallisen metsäteollisuuden tuotannosta.

Tuulivoiman merkitys Suomen energiahuollossa kasvaa kaikissa vähähiiliskenaarioissa moninkertaiseksi vuoteen 2050 mennessä. Suurimmaksi sen osuus nousee Jatkuva kasvu, Pysähdys- ja Muutos-skenaarioissa, joista viimeksi mainitussa kaikkein suurimmaksi. Muutos-skenaariossa tuulienergian osuus nousee yli neljäsosaan kaikesta uusiutuvasta energiasta. Erot skenaarioiden välillä ovat samansuuntaiset aurinkoenergiassa, jota hyödynnetään Muutos-skenaariossa ylivoimaisesti eniten mutta verrattain runsaasti myös Jatkuva kasvu -skenaariossa.

Liikenteen fossiilisten polttonesteiden korvaamisen tarve tulee esiin kaikissa skenaarioissa biopolttoaineiden jalostuksen puunkäytön lisääntymisenä. Sen lisäksi joudutaan tulosten mukaan jossain määrin lisäämään myös bioöljyjen tuontia, mikä näkyy tuntuvana erityisesti Base-80%-skenaariossa. Peltobiomassoista saadaan merkittävä lisä bioenergian tuotantoon niissä skenaarioissa, joissa ruoantuotantoon käytetty peltoala vähenee (Jatkuva kasvu ja Muutos). Kuvan 14 uusiutuvan energian taseessa on mukana myös lämpöpumppujen uusiutuva primaarienergia, joka sekin kasvaa huomattavaksi vuoteen 2050 mennessä.

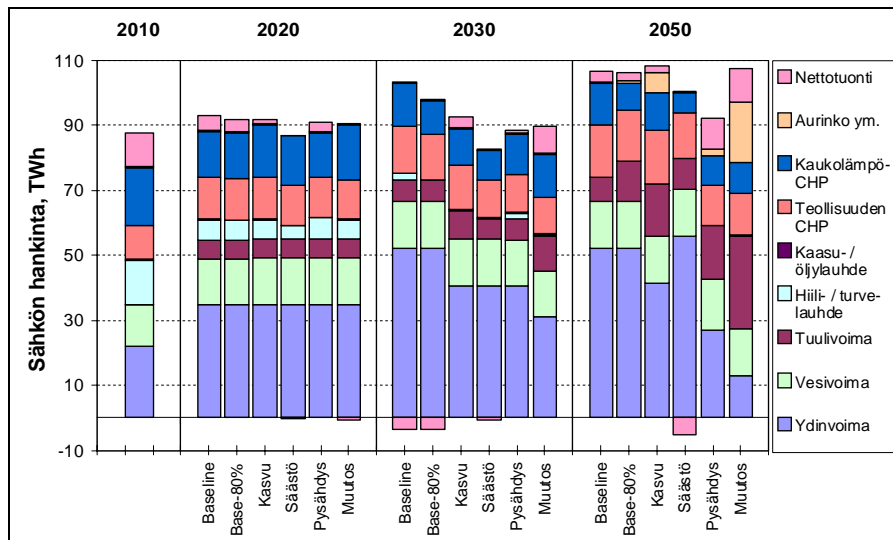


Kuva 14. Uusiutuvan primaarienergian kehitys skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Sähkön hankinta on energiajärjestelmän keskeisimpiä osia, jonka tulevaisuudesta on varsin erilaisia näkökantoja niin sähkön kysynnän kuin hankintarakenteen kehittymisen osalta. Kuten kuvasta 15 nähdään, tulosten mukaan sähkön kokonaiskulutus nousee Baseline-skenaariossa 107 TWh:iin vuonna 2050, missä on 22 % kasvua vuoteen 2010 verrattuna. Vähähiiliskenaariossa sähkön kokonaiskulutus nousee suurimmillaan 109 TWh:n määrään vuonna 2050, mutta alimmillaan se jää 90 TWh:n tasolle, mikä on lähes sama määrä kuin vuonna 2010.

Vähähiilisen Suomen energiahuollossa sähkön tuotannon on oltava käytännössä lähes kokonaan päästötöntä tai jopa päästötaseeltaan negatiivista, sillä muilla sektoreilla päästöjen voimakas vähentäminen tulee ainakin nykyinäkin vielä kalliimmaksi. Suurimman haasteen tämä asettaa kaukolämpövoiman tuotannolle, jolla on Suomen sähköhuollossa varsin suuri merkitys. Suurten asutuskeskusten sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannon pitäisi pohjautua vuoteen 2050 mennessä lähes kokonaan joko bioenergiaan, hiilineutraaleihin synteettisiin polttoaineisiin tai hiilidioksidin talteenotolla varustettuun tuotantoon, mitä on niin logistisesti kuin taloudellisesti vaikea toteuttaa, vaikka se teknisesti olisikin mahdollista. Niinpä tulosten mukaan kaukolämpövoiman osuus sähkön kokonaistuotannosta vähenee kaikissa vähähiiliskenaarioissa selvästi vuoteen 2050 mennessä.

Kaukolämpövoiman tuotanto säilyy suurimpana Jatkuva kasvu -skenaariossa, jossa suurimpiin asutuskeskuksiin rakennettaisiin happipoltteknikkaan perustuvia, hiilidioksidin talteenotolla varistettuja väliottolaitoksia, jotka voivat käyttää polttoaineena kivihiiltä, turvetta ja biopolttoaineita. Vuonna 2050 myös biomassan kaasutukseen perustuvat kiinteäoksidipoltto-olosuhteet tulevat kilpailukykyisiksi.

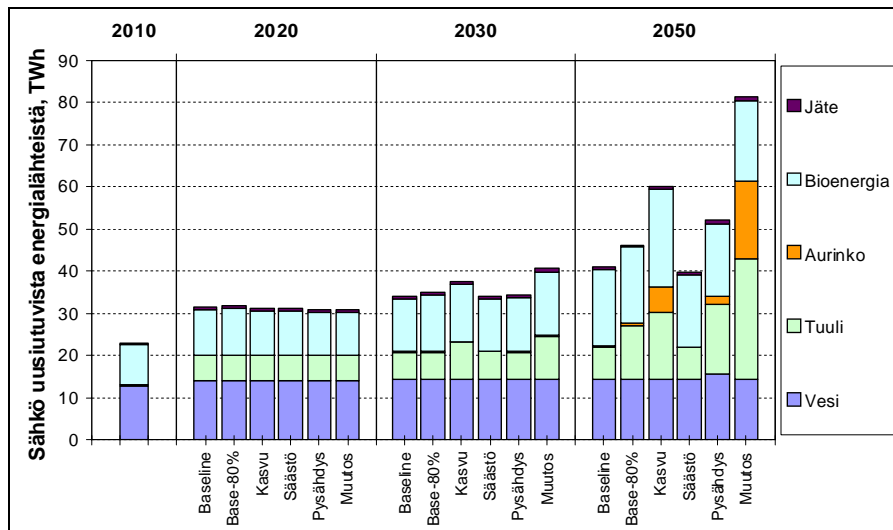


Kuva 15. Sähkön hankinnan kehitys skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Erillisessä sähköntuotannossa keskeisimmät energialähteet ovat ydin-, vesi- ja tuulivoima sekä joissakin tapauksissa myös aurinkoenergia. Vaikka tarkastelluissa skenaarioissa aurinkokennojärjestelmien investointikustannusten oletettiin laskevan vähintään 500 €/kW tasolle, aurinkovoiman kilpailukyky jää tulosten mukaan tällöin vielä verraten huonoksi, mikä näkyy selvästi Base-80%- ja Säästöskenaarioiden tuloksissa. Vasta Jatkuva kasvu ja Muutos-skenaarioissa oletetulla vielä edullisemmalla kustannuskehityksellä aurinkokennot saavat Suomen olosuhteissakin merkittävän aseman sähköntuotannossa. Muutos-skenaariossa kilpailukykyä parantavat lisäksi oletukset uuden sähkön varastointitekniiikan sekä ohutkalvotekniikkaan perustuvan aurinkovoiman nopeasta kehityksestä.

Kuten kuvasta 16 voidaan nähdä, tuulivoima nousee kaikissa skenaarioissa vesi- ja bioenergian rinnalle kolmanneksi keskeiseksi uusiutuvan sähkön energialähteeksi. Sen kokonaistuotanto kasvaa Muutos-skenaariossa lähes 29 TWh:iin, sekä Jatkuva kasvu ja Pysähdys-skenaarioissa noin 16 TWh:iin vuonna 2050. Koska laskentamallissa ei ollut kannustimena tuulivoiman syöttötariffia, vuosille 2025–2030 asetettu 9 TWh:n tuulivoimatavoite saavutetaan vain Jatkuva kasvu ja Muutos -skenaarioissa, tosin pääosin markkinaehtoisesti. Pienimmäksi tuulivoiman osuus jää ydinvoimaan ja energian käytön tehostamiseen painottuvassa Säästöskenaariossa, runsaaseen 9 TWh:iin. Lisäydinvoiman rakentaminen kannattaisikin tämän skenaarion tulosten ajoittaa suurelta osin vasta vuoden 2030 jälkeen.

Bioenergiaan perustuva sähköntuotanto kasvaa vähähiiliskenaarioissa vähintään noin kaksinkertaiseksi vuoteen 2010 verrattuna, ja voimakkaimmin Jatkuva kasvu -skenaariossa. Alhainen metsäteollisuuden tuotanto, johon suuri osa puuenergia-



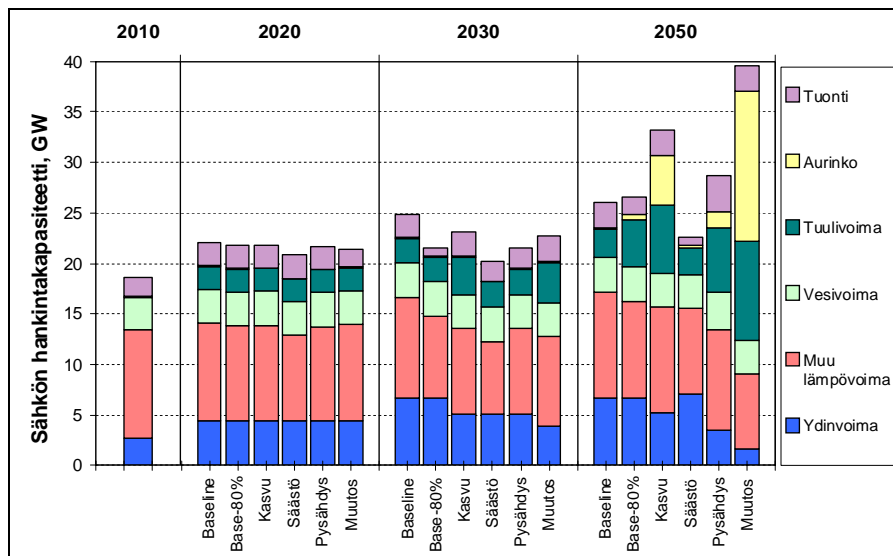
Kuva 16. Sähkön tuotanto uusiutuvilla energialähteillä skenaarioissa vuosina 2010–2050.

potentiaalista on kytköksissä, biojalostamoiden puun tarve sekä logistiikan kustannukset rajoittavat bioenergian vielä suurempaa kasvua sähkön tuotannossa.

Vesivoiman tuotanto kasvaa skenaarioissa vain hitaasti, kun jäljellä olevaa kannattavaa lisäyspotentiaalia otetaan käyttöön ja vanhoja laitoksia uusitaan. Nykyisten vesivoimaa rajoittavien säädösten oletetaan pysyvän voimassa. Minivesivoiman heikommin kannattavaa potentiaalia otetaan merkittävästi käyttöön vain Pysähdys-skenaariossa, jossa vesivoiman tuotanto nousee sen myötä lähes 16 TWh:iin vuonna 2050, kun muissa skenaarioissa tuotanto jää hieman alle 15 TWh:n tason.

Sääolosuhteiden mukaan vaihtuva, tuuli- ja aurinkovoimaan perustuva uusiutuva sähköntuotanto lisää sähkön tuotannon kokonaiskapasiteetin tarvetta, mikä voidaan nähdä kuvasta 17. Skenaariotuloksissa vaikutus alkaa näkyä jo vuonna 2020, jolloin tuulivoimakapasiteettia on jo vähintään 2300 MW. Sähkön hankinnan kokonaiskapasiteetti kasvaa suurimmaksi Muutos-skenaariossa, jossa vaihtelevaa tuotantoa on ylivoimaisesti eniten. Sähkön hankintakapasiteetin keskimääräinen vuotuinen käyttöaika pienenee Muutos-skenaariossa alle 3000 tuntiin, kun vuonna 2010 se oli vielä 4700 tuntia. Vaihtelevan tuotannon laajamittainen integrointi sähkön hankintajärjestelmään merkitsee siten huomattavia investointeja uuteen kapasiteettiin. Vaihteleva tuotanto näkyy myös sähkön tarvittavan tuontikapasiteetin merkityksen korostumisena muissa paitsi Säästö- ja Base-80%-skenaarioissa.

Ydinvoiman osuus sähkön kokonaishankintakapasiteetista on suurimmillaan Säästö-skenaariossa, noin 30 %. Muun lämpövoiman osuus laskee vähähiiliskenaarioissa vuoden 2010 lähes 60 %:n tasolta 19–36 %:iin vuonna 2050.

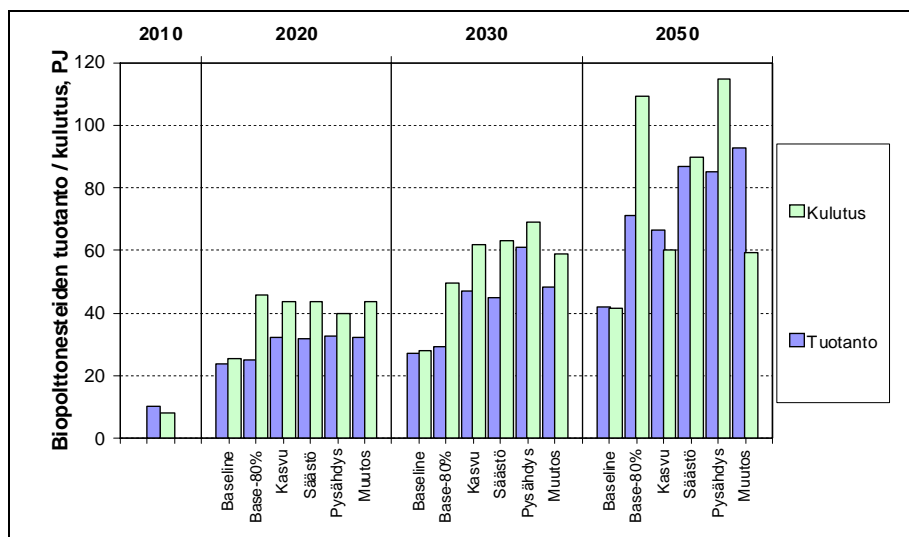


Kuva 17. Sähkön hankintakapasiteetin kehitys skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Biodieseliä tuotettiin Suomessa IEA:n tilastojen mukaan vuonna 2012 noin 11 PJ, josta suurin osa meni vientiin, ja muita polttonesteiden biokomponentteja tuotettiin noin 0,4 PJ (IEA 2013). Biodieselin kotimainen kulutus oli Suomessa samana vuonna noin 5 PJ ja bioetanolin noin 4 PJ (EurObserv'ER 2013). Biokomponenttien osuus liikenteen energian kokonaiskulutuksesta jäi siis vielä vuonna 2012 vain noin 5 %:n tasolle.

Skenaariotulosten mukaan erityisesti 2. sukupolven biopolttonesteiden tuotantoa tulisi kasvattaa Suomessa merkittävästi siirryttäessä asteittain vähähiiliseen yhteiskuntaan. Kun Baseline-skenaariossa biopolttonesteiden tuotanto on vuonna 2020 noin 25 PJ ja vuonna 2050 runsaat 40 PJ, vähähiiliskenaarioissa se kasvaa suurimmillaan hieman yli 90 PJ:n määrän vuonna 2050. Suurin osa tuotannosta on 2. sukupolven biodieselin valmistusta, kun taas bensiinin biokomponentit jäävät pääosin tuonnin varaan. Kotimainen kulutus jää pienimmäksi Jatkuva kasvu ja Muutos-skenaarioissa, joissa se on 60–66 PJ vuonna 2050. Muutos-skenaariossa biojalosteiden tuotannosta tulee siten myös huomattava vientiteollisuuden haara, kuten kuvasta 18 voidaan havaita.

Tulosten mukaan liikenteen päästöjen voimakas vähentäminen edellyttää siis kaikissa tapauksissa merkittävää biopolttoaineiden osuuden lisäämistä, vaikka uudet sähkö- ja hybridiajoneuvotekniikat kaupallistuisivat laajassakin mitassa. Jatkuva kasvu, Säästö ja Muutos -skenaarioissa Suomi olisi biopolttonesteiden osalta omavarainen, näistä ja Muutos-skenaariossa jopa biojalosteiden nettoviejä. Tuontiriippuvuus jää suurimmaksi Base-80%-skenaariossa, jossa lähes kolmannes liikenteen biopolttoaineista jouduttaisiin tuomaan muualta.

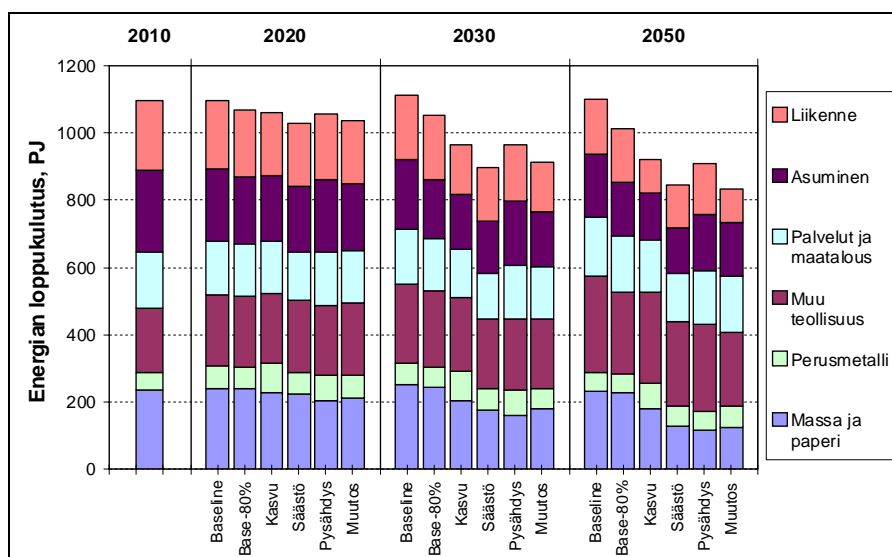


Kuva 18. Biopolttonesteiden tuotanto ja kulutus skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Energian kulutus

Kansantalouden energian kulutusta voidaan mitata monesta eri näkökulmasta. Yhtenä ääripäänä voidaan tarkastella primaarienergian kulutusta, jota on edellä tarkasteltu energian tuotantona. Toisena ääripäänä voidaan puhua hyötyenergian kulutuksesta, joka tarkoittaa energiapalvelujen kulutusta, vaikkapa valaistuksen tai kuljetusten hyötykilometrien määrää. Koska hyötyenergian kulutusta on usein vaikea mitata, tilastoinnissa käytetään vakiintuneesti käsitettä energian loppukulutus, joka tarkoittaa kaikilla muilla sektoreilla paitsi energiasektorilla kulutetun energian määrää. Skenaariotulosten mukainen loppukulutus on esitetty kuvassa 19.

Suomessa energian loppukäyttö oli vuonna 2010 yhteensä noin 1100 PJ, josta polttoaineita oli noin 650 PJ, sähköä noin 300 PJ ja lämpöä noin 150 PJ. Tarkastelluista skenaarioista Baseline-skenaariossa loppukulutus pysyy koko tarkasteluaikavälin suunnilleen vakiona ja on vuonna 2050 edelleen noin 1100 PJ. Vähähii-liskenaarioissa loppukulutus kääntyy vuoden 2020 jälkeen laskuun ja päättyy vuo-teen 2050 mennessä 7–22 % pienemmälle tasolle. Pienimmäksi loppukulutus putoaa Muutos- ja Säästö-skenaarioissa, joissa se on noin 850 PJ. Muutos-skenaariossa vähennys johtuu pääosin energiaintensiivisen teollisuuden supistu- misesta ja sähköistymisestä, ja Säästö-skenaariossa erityisesti energian käytön tehostumisesta. Lievin vähennys loppuenergian kulutuksessa saavutetaan Base- 80%-skenaariossa, jossa teollisuuden tuotanto on Baseline-skenaarion mukainen ja tekninen kehitys oletettiin tavanomaiseksi.

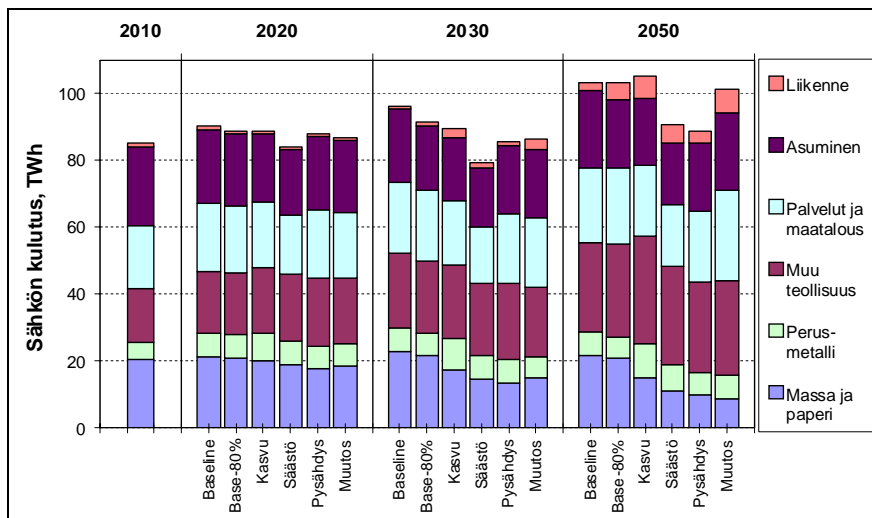


Kuva 19. Energian loppukulutus sektoreittain skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Loppuenergian kulutuksen väheneminen kohdistuu ennen kaikkea polttoaineisiin ja lämpöön, toisaalta siksi, että niiden tuotannossa fossiilisten polttoaineiden osuutta on vaikea vähentää voimakkaasti, ja toisaalta sen vuoksi, että energian kysyntä kohdistuu muutoinkin tulevaisuudessa entistä enemmän sähköllä tuotettuihin palveluihin. Kansantalouden energiankäytön pitkäaikainen sähköistymistrendi siis jatkuu edelleen, ja siirtyminen vähähiiliseen yhteiskuntaan pikemminkin voimistaa sähköistymistä kuin hidastaa sitä. Toinen merkittävä kehitystrendi on teollisuuden osuuden kasvaminen loppuenergian kulutuksessa, mikä johtuu pitkälti oletetusta suotuisasta teollisuuden kehityksestä kokonaisuutena Suomessa. Lisäksi rakennusten ja liikenteen energiankäytön merkittävä tehostuminen kasvattaa teollisuuden osuutta entisestään loppuenergian kulutuksesta.

Kuvassa 20 on havainnollistettu sähkön kokonaiskulutuksen kehitystä tarkastelluissa skenaarioissa. Kuvan kulutusluvuissa on loppuenergian lisäksi myös polttoaineiden jalostuksen (öljynjalostus, biojalostamot) sähkön kulutus, joka on luettu kemian teollisuuden osana muuhun teollisuuteen. Metsäteollisuuden kehitystä koskevien oletusten vaikutukset näkyvät selvästi sähkön kulutuksen sektorijakauksessa. Toisaalta skenaarioissa energiantensiivisen teollisuuden alhaisempia tuotantomääriä oli kompensoitu uusien tuotteiden korkeammalla jalostusasteella ja muun vientiteollisuuden nopeammalla kasvulla, jotka puolestaan lisäävät teollisuuden sähkön kulutusta. Muun teollisuuden sähkönkulutuksessa näkyy myös biojalostamojen ja kaivannaistoiminnan tuotannon voimakas kasvu.

Asumisen sähkön kulutus vähenee kaikissa vähähiiliskenaarioissa vuoden 2010 tasosta, mutta muutos ei ole kovin suuri. Kulutuskohteista lämmitys- ja valaistussähkön kulutus tehostuvat voimakkaimmin, mutta vähennystä kompensoi

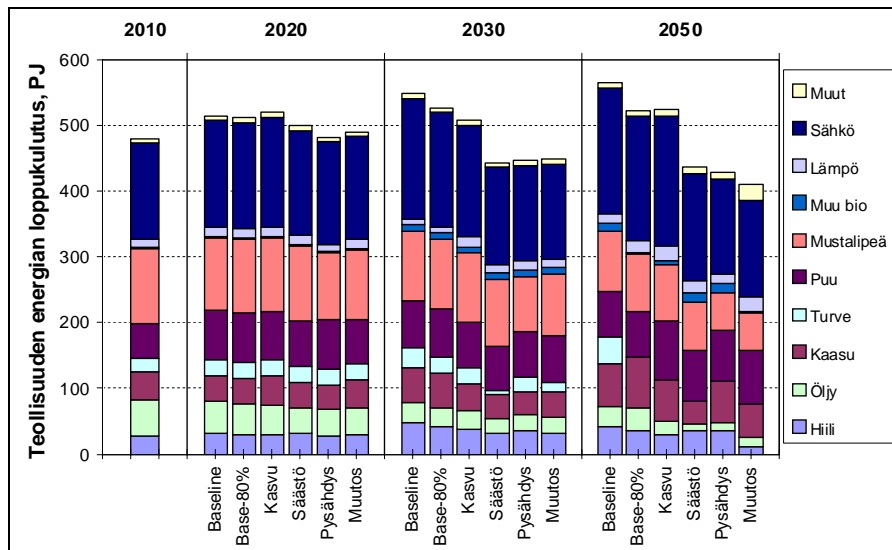


Kuva 20. Sähkön kulutus sektoreittain skenaarioissa vuosina 2010–2050.

laitesähkön kulutuksen kasvu. Samaan tapaan kehittyvät palveluiden sähkön kulutus, jonka trendi on ollut pitkään Suomessa voimakkaasti kasvava, mutta tasaantuu useimmissa skenaarioissa noin 20 TWh:n tasolle. Palvelusähkön kulutuksen kehitys kuuluu tarkastelun merkittävimpiin epävarmuustekijöihin, mitä on pyritty ottamaan huomioon Muutos-skenaariossa, jossa laajenevan palvelusektorin sähkön kysyntä kasvaa selvästi voimakkaimmin.

Koko teollisuuden energian loppukulutuksen kehitystä on havainnollistettu energialähteittäin kuvassa 21. Baseline-skenaariossa loppukulutus kasvaa vuoden 2010 noin 470 PJ:sta noin 560 PJ:n määrään vuonna 2050, mikä merkitsee noin 0,4 %:n vuosikasvua. Vähähiiliskenaarioissa loppukulutus on vuonna 2050 selvästi tätä pienempi ja pienimmillään Muutos-skenaariossa, jossa kulutus jää yli 20 % vuoden 2010 tasoa pienemmäksi.

Monissa prosessiteollisuuden käyttökohteissa fossiilisten polttoaineiden korvaaminen on teknisesti hankalaa tai kallista, mikä näkyy myös skenaariotuloksissa. Hiilen käyttö pysyy vuoteen 2030 saakka nykytasolla tai jopa hieman kasvaa, mikä johtuu pääosin perusmetallien ja sementin tuotannosta. Mineraaliöljyn kulutusta sen sijaan voidaan tulosten mukaan vähentää merkittävästi, jolloin vuonna 2050 kulutus jää parhaimmillaan murto-osaan nykyisestä. Fossiilista öljyä voidaan korvata maakaasulla ja biopolttoaineilla sekä osittain energiapalveluja sähköistämällä. Bioenergian kokonaiskäyttö kasvaa tulosten mukaan teollisuuden loppukulutuksessa tuntuvasti, lukuun ottamatta kemiallisen metsäteollisuuden mustaliipeä, jonka määrän vähenemiseen vaikuttaa sekä oletettu sellun tuotanto että sivutuotteen kasvava käyttö sähkön tuotannossa.

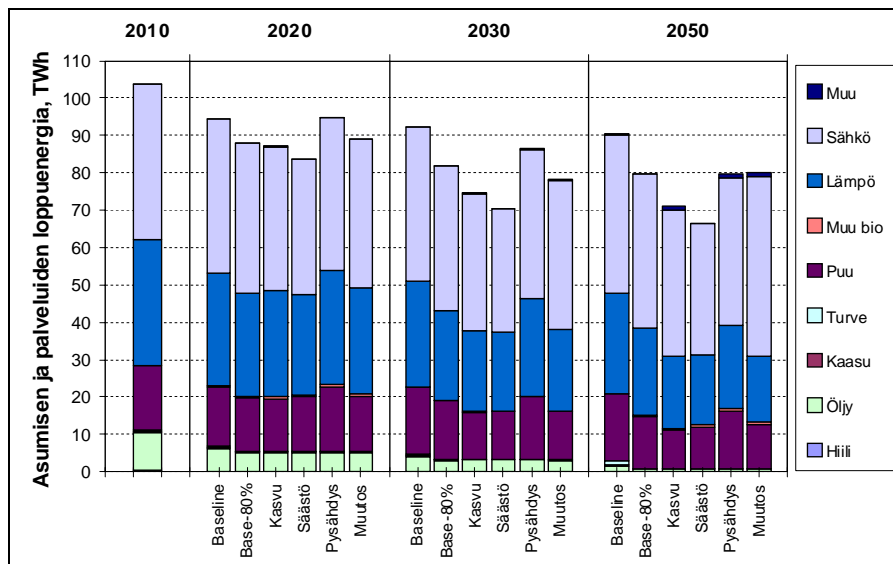


Kuva 21. Energian loppukulutus teollisuudessa skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Asumisen ja palveluiden energian loppukulutuksen kehitys on esitetty kuvassa 22. Näiden sektoreiden energian käyttöä voidaan pyöreästi nimittää myös rakennusten energiankulutukseksi, sillä se sisältää teollisuus- ja maatalousrakennuksia lukuun ottamatta kaiken rakennuksissa kulutetun energian. Suomessa suurin osa rakennusten loppuenergian käytöstä on nykyisin lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden valmistukseen kuluvaa energiaa, mutta sähkölaitteisiin, valaistukseen ja jäähdytykseen kuluvan muun energiakäytön osuus on ollut jatkuvassa kasvussa ja osuuden kasvu jatkuu tulevaisuudessa.

Baseline-skenaarion tulokset heijastavat nykyisten rakennussäädösten ja odotettavissa olevien tiukennusten vaikutuksia. Vähähiiliskenaarioista Jatkuva kasvu, Säästö ja Muutos -skenaarioissa energiatehokkuusnormien oletettu voimakkaampi kiristyminen tuo lisäsäästöjä erityisesti lämmityksessä. Tuloksista voidaan nähdä, että rakennusten kokonaisenergiankulutus laskee Baseline-skenaariossa vuoden 2010 kulutustasosta vajaat 15 % vuoteen 2050 mennessä ja vähähiiliskenaarioissa vastaavasti 23–38 %. Merkittävää on sähkön käytön osuuden kasvu kotitalouksien ja palvelusektorin kokonaisenergiankulutuksesta ja vastaavasti kaukolämmityksen osuuden pieneneminen. Öljylämmityksestä luovutaan käytännössä kokonaan kaikissa vähähiiliskenaarioissa vuoteen 2050 mennessä.

Setä kotitalouksien että palvelujen laitesähkön kulutuksen osalta skenaarioiden väliset erot johtuvat toisaalta uusien laitteiden tehokkuuseroista ja toisaalta eroista kotitalouksien ja palvelujen hyötyenergian kysynnän skenaario-oletuksissa. Muu-

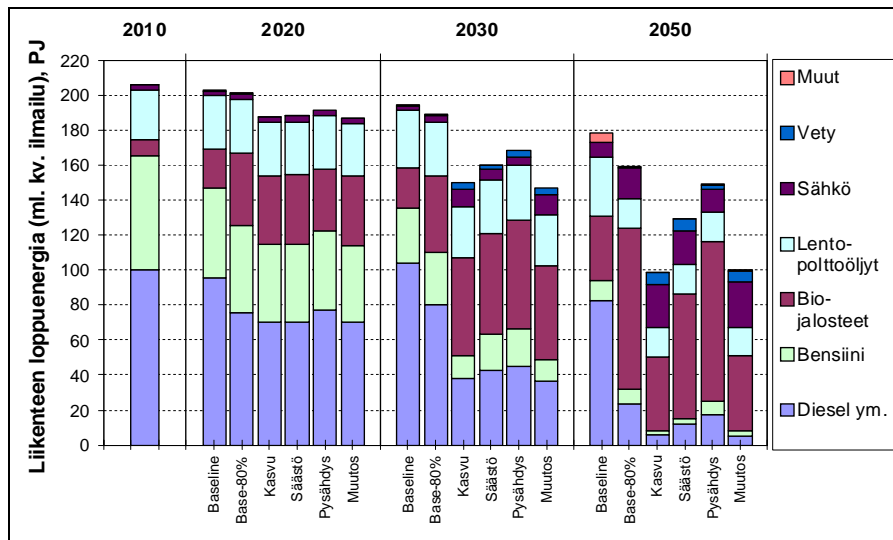


Kuva 22. Asumisen ja palveluiden energian loppukulutus skenaarioissa vuosina 2010–2050.

tos-skenaariossa niin kotitalouksien kuin palvelujen sähköenergian käyttökohteiden oletettiin laajenevan tuntuvimmin, mikä johtaa tuloksissa sähkön kokonaiskulutuksen kasvuun vaikka samalla lämmityssähkön kulutus vähenee.

Liikenteen loppuenergiakulutusta tarkasteltaessa (Kuva 23) nähdään liikenteen energiankäytön tehostuminen erityisesti Jatkuva kasvu ja Muutos-skenaarioissa, joissa oletuksena oli nopeutettu uuden teknologian käyttöönotto. Biojalosteet korvaavat fossiilisia polttoaineita erityisesti Base-80%, Säästö- ja Pysähdys-skenaarioissa. Jatkuva kasvu- ja Muutos-skenaarioissa biojalosteiden rinnalla päästöjä alkavat vähentää erityisesti sähköautot, joiden markkinaosuus kasvaa voimakkaasti vuoden 2030 jälkeen. Näissä skenaarioissa myös fossiilisten polttoaineiden käyttö tieliikenteessä putoaa noin 3 TWh:iin ja kotimaisen liikenteen kokonaisenergiakulutus noin puoleen nykytasosta.

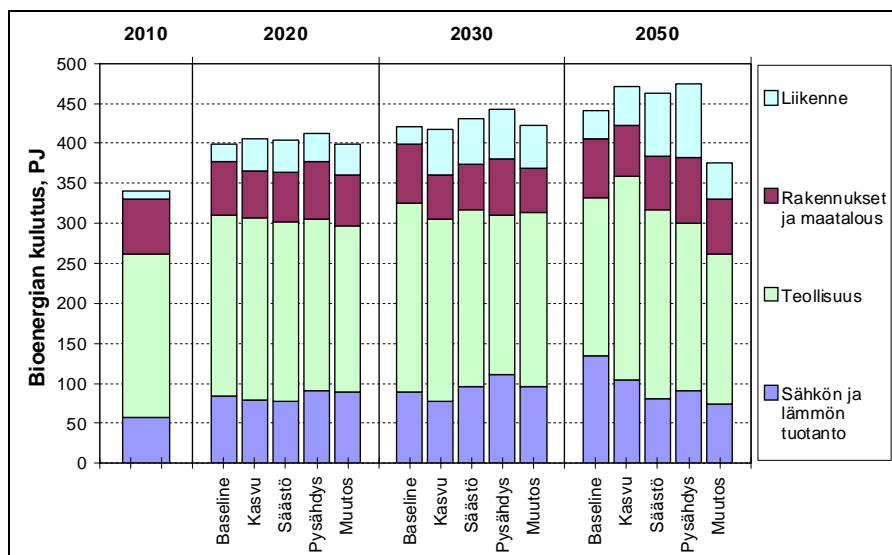
Tarkasteltaessa loppukulutuksen jakaantumista liikennemuodoittain ja kulkutavoittain voidaan nähdä, että erityisesti henkilöautoliikenteen energiankulutus vähenee, mikä johtuu toisaalta oletuksista entistä tehokkaamman uuden ajoneuvoteknologian käyttöönotosta ja toisaalta liikkumistarpeen ja -tottumusten muutoksista. Lentoliikenne on ainoa liikennemuoto, jonka loppuenergian kulutus ei vuoteen 2050 mennessä käänny merkittävään laskuun, mutta fossiilista lentokerosiinia korvaavilla biopolttoaineilla voidaan tuntuvasti vähentää myös lentoliikenteen päästöjä. Kun kansainvälinen lentoliikenne luetaan mukaan (mutta laivaliikenne ei), ilmailun osuus liikenteen loppuenergiasta nousee Jatkuva kasvu- ja Muutos-skenaarioissa jopa kolmannekseen, ja siitä tulee energian kulutukseltaan suurin liikennemuoto.



Kuva 23. Liikenteen energian loppukulutus skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Bioenergian kulutuksen jakaantumisessa eri sektoreille ei loppujen lopuksi ole kovin suuria eroja eri skenaarioiden välillä. Jo nykypolitiikan mukaisessa Baseline-skenaariossa biopolttoaineiden kokonaiskäyttö kasvaa vuoteen 2030 mennessä yli 400 PJ:n, kun se vuonna 2010 oli noin 340 PJ. Vaikka vähähiiliskenaarioissa erot metsäteollisuuden tuotannossa vaikuttavat puupolttoaineiden tuotantopotentiaaliin, bioenergian kokonaiskäytössä erot tasoittuvat siten, että kokonaiskulutus on vuonna 2030 kaikissa skenaarioissa on 410 ja 450 PJ:n välillä. Vuoden 2050 tuloksissa bioenergian kokonaiskulutus on Muutos-skenaariossa kuitenkin muita vähähiiliskenaarioita selvästi pienempi, ja jää jopa Baseline-skenaariota pienemmäksi. Ero johtuu pääosin siitä, että Muutos-skenaariossa on muista poiketen merkittävää biojalosteiden vientiä, johon kuuluva bioenergia vastaavasti vähentää bioenergian muuta kotimarkkinakulutusta.

Biojalosteiden kasvava tuotanto näkyy tuloksissa myös muilla sektoreilla käytettävän bioenergian määrässä, jota on havainnollistettu kuvassa 24. Teollisuuden bioenergian käyttö sisältää teollisuuden sähkön ja lämmön yhteistuotannon polttoaineet. Tulosten mukaan Jatkuva kasvu -skenaariossa sähkön ja lämmön tuotantoon käytetään tulosten mukaan jo vuonna 2030 hieman Baseline-skenaariota vähemmän bioenergiaa, ja vuoteen 2050 mennessä kaikissa vähähiiliskenaarioissa bioenergiaa käytetään sähkön ja lämmön tuotantoon Baseline-skenaariota vähemmän. Toki siirtymiin vaikuttavat myös erot metsäteollisuuden tuotannossa ja muiden uusiutuvan sähköntuotannon ja ydinvoiman määrässä sekä kaukolämmön kysynnän pieneneminen vähähiiliskenaarioissa.

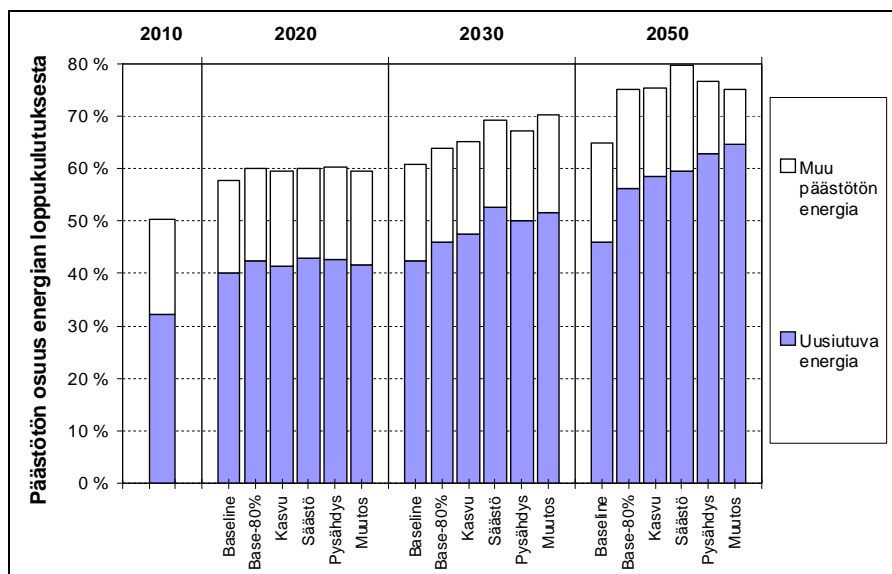


Kuva 24. Bioenergian kulutus sektoreittain skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Vähähiiliseen Suomeen siirryttäessä päästöttömien ja hyvin vähäpäästöisten energiamuotojen osuus luonnollisesti kasvaa. Uusiutuvien energiamuotojen ohella Suomen päästötaseen kannalta päästöttömiksi energiamuodoiksi voidaan laskea ydinvoima, sähkön tuonti sekä hiilidioksidin talteenoton avulla varustetut synteettiset polttoaineet, kuten vety. Kuvassa 25 on esitetty sekä uusiutuvien energialähteiden että muiden päästöttömien energiamuotojen osuus energian loppukäytöstä. CCS:n avulla fossiilista polttoaineista tuotettua sähköä ja lämpöä ei siis ole kuvassa laskettu päästöttömäksi.

Uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta oli 28,7 % vuonna 2005, 32,2 % vuonna 2010 ja 35,1 % vuonna 2012 (Tilastokeskus 2014, TEM 2013). Tulosten mukaan uusiutuvien osuus loppukulutuksesta nousee vuoteen 2020 mennessä jo Baseline-skenaariossa yli 40 %:n eli selvästi Suomelle asetettua 38 %:n tavoitetta suuremmaksi, ja vähähiiliskenaarioissa osuus nousee vielä hieman korkeammaksi. Vuoteen 2050 mennessä osuus kasvaa parhaimmillaan noin 65 %:iin Muutos-skenaariossa. Baseline-skenaariossa nousu jää kuitenkin vuoden 2020 jälkeen varsin hitaaksi, ja osuus on noin 46 % vuonna 2050.

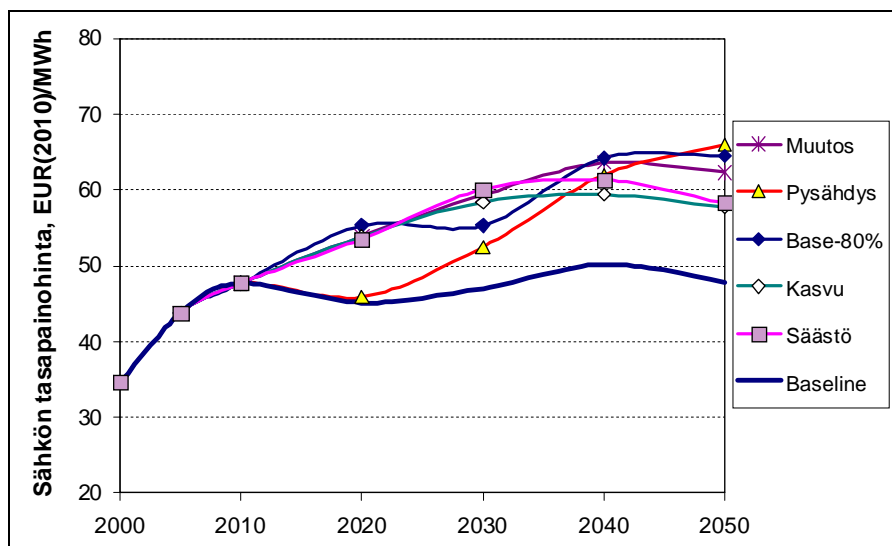
Kaikkien päästöttömien energialähteiden osuus energian loppukulutuksesta oli Suomessa vuonna 2010 jo noin 50 %. Kaikissa vähähiiliskenaarioissa osuus nousee vuoteen 2050 mennessä 75–80 %:iin. Suurin osuus, 80 %, saavutetaan Säästö-skenaariossa, muun muassa laajimman ydinvoimatuotannon ansiosta.



Kuva 25. Uusiutuvan ja muun hiilineutraalin energian osuus energian loppukulutuksesta skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Tärkeimmät sähkön kokonaiskulutuksen tasoon vaikuttavat tekijät ovat hyötyenergian kysynnän kehitys eri sektoreilla, sähkön hinnan kehitys, loppukulutuksen teknologian kehitys ja kilpailevien energialähteiden hintojen kehitys. Laskentamallin tulosten mukaan sähkön hankinnan pitkän aikavälin marginaalihinta on Baseline-skenaariossa verraten vakaa ja pysyy karkeasti vuoden 2010 tasolla, kuten kuvassa 26 on havainnollistettu. Vähähiiliskenaarioista vain Pysähdys-skenaariossa hinta pysyy vuoteen 2020 saakka Baseline-skenaarion tasolla, mutta muissa skenaariossa hinta nousee jo siihen mennessä noin 20 % korkeammaksi. Vuoteen 2050 mennessä hintaero Baseline-skenaarioon jää kaikissa vähähiiliskenaarioissa alle 40 %:n, ja se on pienimmillään Jatkuva kasvu -skenaariossa, jossa sähkön hinta on vain noin 20 % perusuraa korkeampi. Korkeimmaksi sähkön hinta nousee vuonna 2050 Pysähdys- ja Base-80%-skenaarioissa.

Muutokset sähkön pitkän aikavälin tasapainohinnassa jäävät siten skenaarioiden perustapausten tulosten mukaan verrattain maltillisiksi, ja merkittävästi pienemmiksi kuin vaikkapa päästöoikeuksien hintojen kehityksen perusteella voisi suoraan arvioida. On huomattava, että mallin tuottama pitkän aikavälin tasapainohinta ei vastaa todellista hintaa Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla, mutta sähkön hinnan muutoksia voidaan silti pitää suuntaa-antavina. Vertailun vuoksi voidaan todeta, että vuonna 2013 Suomen aluehinta oli Fingridin tilastojen mukaan keskimäärin alle 40 €/MWh vuoden 2010 hintatasossa.



Kuva 26. Sähkön pitkän aikavälin reaalisen tasapainohinnan kehitys skenaarioissa vuosina 2010–2050.

4.2 Päästöjen vähentäminen

Vähähiilisen Suomen saavuttaminen edellyttää voimakkaita vähennyksiä niin hiilidioksidin kuin muiden kasvihuonekaasujen päästöissä. Työssä vähähiilitavoitetta simuloitiin koko Euroopan laajuisella ilmastopoliitikalla, jonka mukaan kaikkien Kioton sopimukseen sisältyvän kuuden kasvihuonekaasun kokonaispäästöjä tulee vähentää vuoteen 2050 mennessä 80 % vuoden 1990 tasoon verrattuna. Lähtökohtana oli, päästövähennystavoite toteutetaan EU:n sisäisin toimin, eli laskelmissa ei huomioitu mahdollisuuksia hyödyntää ns. joustomekanismein toteutettuja päästövähennyksiä, jolloin toimet toteutuisivat EU-alueen ulkopuolella.

Näin voimakkaiden päästönvähennysten aikaan saaminen on haastava tavoite, jota on voi olla vaikea saavuttaa puhtaasti kotimaisin toimin, ellei myös hiilidioksidin nielujen lisäämistä oteta huomioon. Tarkastelluissa mallilaskelmissa päästöta-voitteissa otettiin nieluihin vaikuttavana keinona huomioon ainoastaan hiilidioksidin talteenotto ja varastointitekniikat (CCS), mukaan lukien BECCS eli bio-CCS, sillä ne ovat jo hyväksytyjä YK:n ilmastopimuksen kasvihuonekaasujen päästöinventareissa (IEA 2011). Toinen keskeinen nieluihin vaikuttavien keinojen ryhmä liittyy maankäyttöön, maankäytön muutoksiin ja metsätaloussktoriin (LULUCF). Metsien hakkuusäästön kasvaminen voi myös periaatteessa tulla Suomelle merkittävaksi päästötaseeseen vaikuttavaksi keinoksi, mutta koska tähän liittyy merkittäviä epävarmuuksia, LULUCF-sektori rajattiin päästötasetarkasteluiden ulkopuolelle TIMES-mallilla tehdyissä skenaariolaskelmissa. Metsien hiilivarantojen skenaariokohtaisia muutoksia tarkasteltiin LCFinPlat-hankkeessa kuitenkin erillistarkasteluna, jonka suoritti ja raportoi Metsäntutkimuslaitos (Kallio et al. 2014).

Biomassan käyttöön liittyy merkittävää epävarmuutta sen suhteen, miten jatkossa esimerkiksi EU:ssa määritellään biomassan käytön ja biojalosteiden tuotannon kestävyyskriteerit. Tämän vuoksi herkkyystarkasteluna simuloitiin järjestelmämallin avulla lisäksi metsähakkeen pienpuujakeen sekä kuitupuun hyödyntämisen ilmas-tovaikutuksia laskennallisten GWP-kertoimien avulla (ks. luku 5.1).

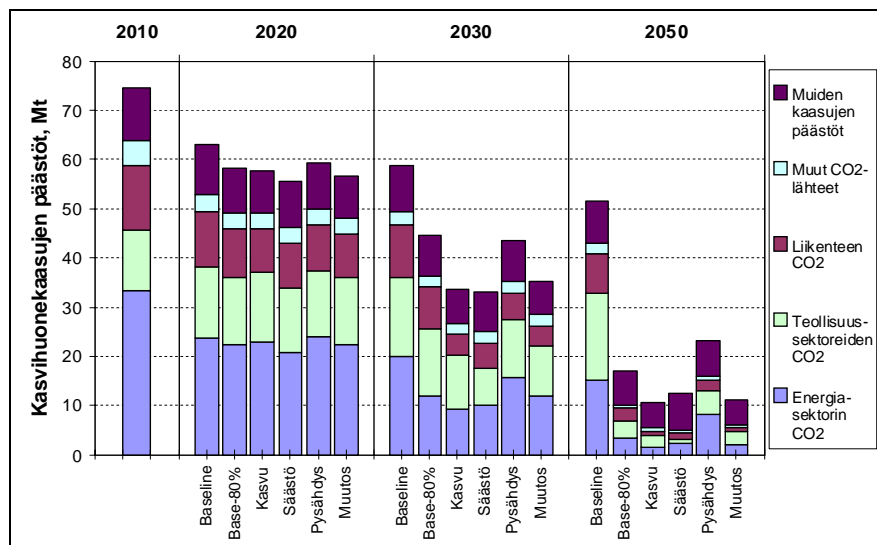
Kuvassa 27 on havainnollistettu tulosten mukaista kasvihuonekaasujen kokonais-päästöjen kehitystä tarkastelluissa skenaarioissa. Nykypoliikkaan pohjautuvassa Baseline-skenaariossa päästöt vähenevät runsaan 50 milj. tonnin tasolle vuoteen 2050 mennessä, mikä vastaa vain noin 30 %:n vähennystä vuoteen 1990 verrat-tuna. Huomautettakoon, että Baseline-skenaariossa ei ole otettu huomioon EU:n vuonna 2014 laatimaa niin sanottua 2030-ilmasto- ja energiapakettia.

Vähähiiliskenaarioissa päästöt puolestaan vähenevät 67–85 % vuoteen 2050 mennessä. Pitäen kriteerinä vähintään 80 %:n vähennystä kokonaispäästöissä, tavoite vähähiilisestä Suomesta toteutuu tulosten mukaan Jatkuva kasvu, Säästö ja Muutos -skenaarioissa, mutta jää hieman vajaaksi Base-80%-skenaariossa ja

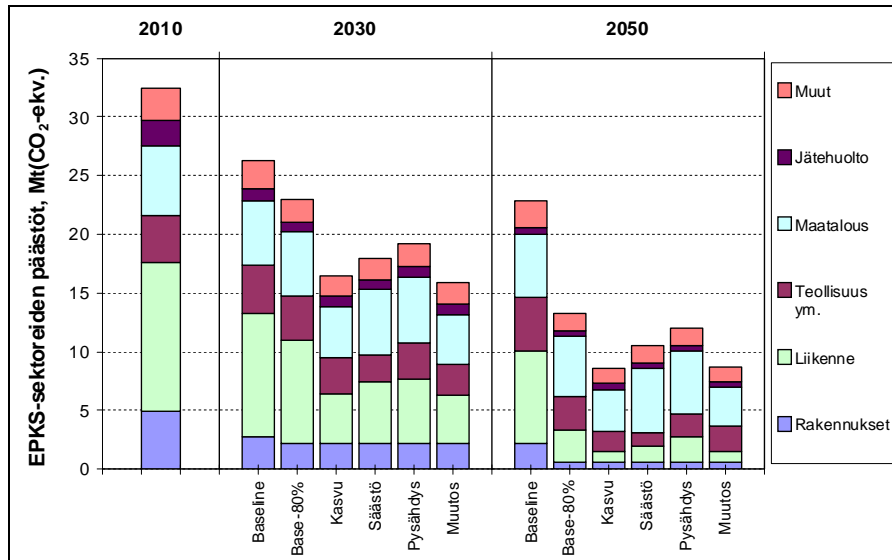
vielä selvemmin Pysähdys-skenaariossa. Kolmessa ensin mainitussa skenaariossa Suomen päästövähennys ylittää myös EU:n 2030 -ilmastopakettin 40 %:n vähennystavoitteen vuonna 2030, sillä niissä saavutetaan noin 50 %:n vähennys vuoden 1990 KHK-päästöihin verrattuna. Base-80%- ja Pysähdys-skenaarioissa jäädyään jonkin verran tuon tavoitteen alle.

Nykyisten päästökauppasektoreiden päästöjä kannattaa vähentää tulosten mukaan voimakkaammin kuin ei-päästökauppasektoreiden päästöjä. Tämä korostuu erityisesti skenaarioissa, joissa CCS:n oletetaan kaupallistuvan laajassa mitassa. Suomen energiajärjestelmän erityispiirteenä on bioenergian laaja hyödyntäminen myös suuren kokoluokan energiantuotannossa, mikä tekee mahdolliseksi soveltaa CCS:ää bioenergian poltosta vapautuvan hiilidioksidin talteenottoon. Osa päästökauppasektoreista voisi tällöin tuottaa negatiivisia nettopäästöjä, mikäli biomassan käyttö käsitellään myös tulevaisuudessa hiilineutraaliksi. Nykyinen ilmastopoliittika ei kuitenkaan tunnista ns. negatiivisia KHK-päästöjä, joten tässä työssä on lähtökohtaisesti oletettu, että globaalin 2 asteen ilmastopoliittikan toteutuminen edellyttää BECCS:n huomioimisen päästöjen vähennyskeinona ja negatiivisten päästöjen huomioimisen päästökauppajärjestelmässä.

Ei-päästökauppasektoreiden päästöjen kehitystä on havainnollistettu tarkemmin kuvassa 28. Vuonna 1990 näiden sektoreiden kokonaispäästöt olivat noin 36 Mt (Lindroos et al. 2011), joten tuloksista voidaan nähdä, että ei-päästökauppasektoreiden päästöjen vähennys on vuonna 2050 suurimmillaan noin 76 % vuo-



Kuva 27. Kasviuonekaasujen päästöjen kehitys skenaarioissa päälukittain vuosina 2010–2050.



Kuva 28. Ei-päästökauppasektoreiden päästöjen kehitys skenaarioissa vuosina 2010–2050.

teen 1990 verrattuna. Merkittävimmin päästöjä voidaan vähentää liikenteessä sekä rakennusten lämmitysenergian käytössä. Vuoteen 2030 mennessä liikenteen päästöjä voidaan vähentää pääosin biopoltonesteiden ja ajoneuvokannan energiatehokkuuden paranemisen avulla, mutta sen jälkeen uuden ajoneuvoteknologian merkitys korostuu erityisesti Jatkuva kasvu ja Muutos -skenaarioissa.

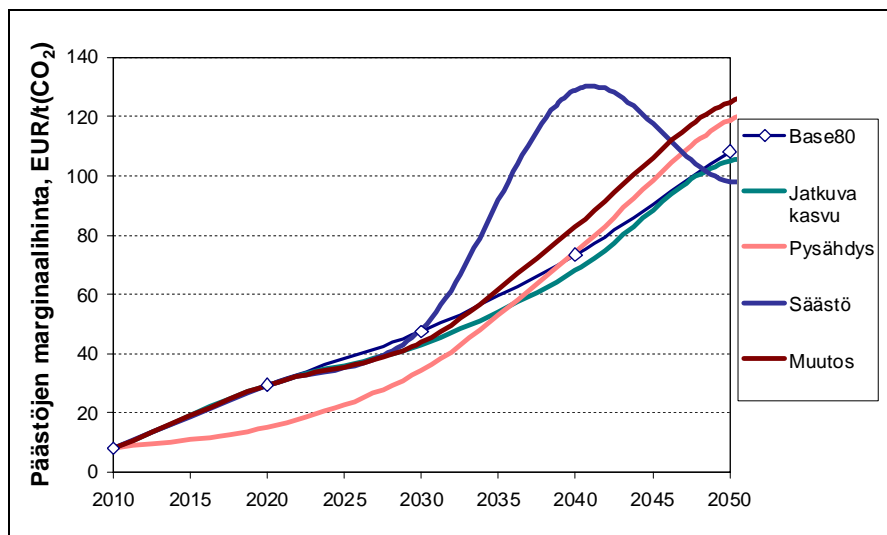
Myös jätehuollon päästöjä voidaan tulosten mukaan vähentää edelleen merkittävästi jätteen kaatopaikkasijoitusta koskevien rajoitusten sekä kompostoinnin ja kierrätyksen tehostamisen avulla. Maatalous sen sijaan kuuluu vaikeimmin vähennettäviin päästölähteisiin, erityisesti ei-energiaperäisten metaani- ja dityppioksidipäästöjen osalta. Vain Jatkuva kasvu ja Muutos -skenaarioissa maatalouden päästöissä saavutetaan merkittävä vähennys vuoteen 2050 mennessä, mikä on kuitenkin suurelta osin vain seurausta skenaarioissa oletetusta kotimaisen maataloustuotannon vähenemisestä.

Päästöjen vähentämisen marginaalikustannuksia, joita voidaan verrata päästöoikeuksien marginaalihintaan, on havainnollistettu kuvassa 29. Marginaalikustannukset kuvastavat sitä hintaa, joka päästöoikeuksilla tulisi olla, jotta teoreettisen, kaikki päästölähteet käsittävissä päästökaupan avulla päästäisiin asetettuihin päästötavoitteisiin. Kaikissa globaalin ilmastopolitiikan sisältävissä skenaarioissa marginaalihinta nousee jo vuoteen 2020 mennessä lähes 30 €:n tasolle, mikä osaltaan osoittaa, että pyrittäessä rajoittamaan maapallon lämpeneminen 2° C:seen päästöjen rajoittamiseen tulisi ryhtyä nopeasti.

EU:n päästökaupan käynnistyessä vuonna 2005 päästöoikeuden hinta kävi hetkellisesti hintatasolla 20–30 €/t, mutta jo useiden vuosien ajan päästöoikeuden hinnat ovat pysyneet alle 5 €/t CO₂-tasolla. EU:n omien skenaariolaskelmien mukaan päästöoikeuden hinta nousisi jo EU:n referenssiskenaariossa keskimäärin 35 euroon vuonna 2030, 57 euroon vuonna 2035, 78 euroon vuonna 2040 ja 100 euroon vuonna 2050 (EU 2013).

Koska EU:n laajuiset päästötavoitteet olivat Säästö-skenaariota lukuun ottamatta kaikissa vähähiiliskenaarioissa samat, myös päästöjen marginaalihinnan kehitys on suunnilleen samanlainen näissä skenaarioissa, ja päättyy runsaan 100 €/t tasolle vuonna 2050. Tulokset ovat näiltä osin verraten maltillisia, sillä kuten yllä todettiin, jo EU:n referenssiskenaariossa päästöoikeuden hinnaksi on arvioitu 100 €/t vuonna 2050. Pysähdys ja Muutos-skenaarioissa hinta nousee hieman korkeammaksi, sillä niissä CCS:n kaupallisen soveltamisen oletettiin jäävän rajoitetuksi.

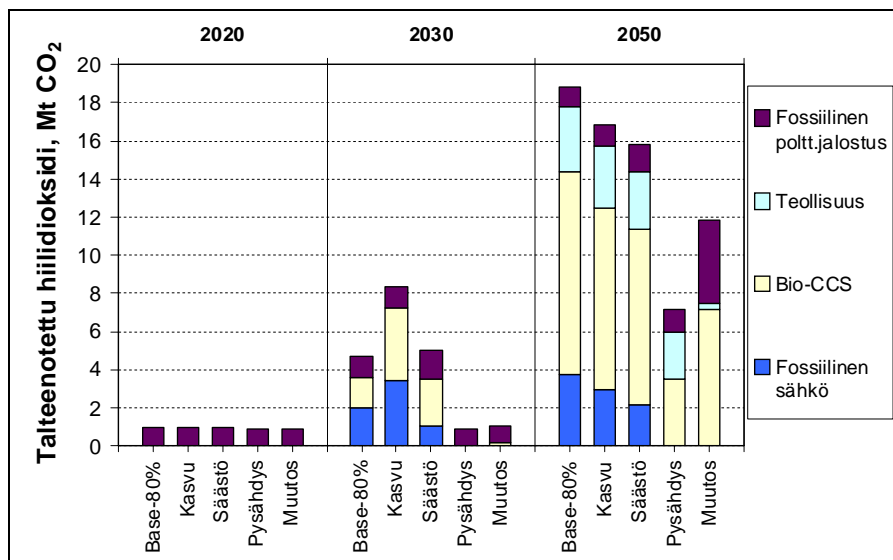
Laskentamallin tulosten mukainen CCS:n hyödyntämisen laajuus Suomessa käy ilmi kuvasta 30. Kuten kuvasta nähdään, kaupallistuessaan CCS:llä voi tulosten mukaan olla merkittävä rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisessa, erityisesti päästötavoitteiden kiristyessä merkittävästi vuosina 2040–2050. Suomen olosuhteissa erityisesti bioenergian hyödyntämiseen perustuvat BECCS-sovellukset voivat nousta houkuttelevaksi päästöjen vähennysteknologiaksi, mikä luonnollisesti käytännössä edellyttäisi niiden hyväksymistä päästökauppajärjestelmän piiriin. Ilman BECCSiä CCS:n merkitys jää tulosten mukaan Suomessa verrattain pieneksi, enimmillään noin 8 miljoonaa tonniin.



Kuva 29. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen rajakustannus skenaarioissa vuosina 2010–2050.

Hiilidioksidin talteenotto on erityisen edullista biopolttoaineiden jalostuksen yhteydessä, mikä voi tarjota suomalaiselle suuren mittakaavan puupohjaisille biojalostamoille kilpailuetua. Myös kivihiilen käyttöön perustuva happipoltteknologia tulisi tulosten mukaan kilpailukykyiseksi CCS-sovelluskohteena pääkaupunkiseudun yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa vuoden 2030 jälkeen.

Teollisuudessa CCS:llä on merkittävä rooli etenkin konverteriteräksen tuotannossa. Mallilaskelmien mukaan happimasuuniteknologiaan yhdistetty CCS tulisi kannattavaksi vuoden 2030 jälkeen. Sen sijaan esimerkiksi puuhiilen käyttö pelkistimenä ei tulosten mukaan tulisi riittävän kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi terästeollisuuden päästöjen vähennyskeinona.



Kuva 30. Hiilidioksidin talteenottotekniikan (CCS) soveltaminen skenaarioissa vuosina 2020–2050.

5. Tulosten herkkyystarkastelut

5.1 Bioenergian tuotannon kestävyys

Suomen vähähiiliskenaarioissa metsäenergialla on tulosten mukaan varsin keskeinen rooli. Metsien biomassaa voidaan hyödyntää periaatteessa kahdella tavalla ilmastonmuutoksen hillintään. Sitä voidaan käyttää poltto- tai raaka-aineena, joka korvaa joko fossiilisia polttoaineita tai päästöintensiivisiä materiaaleja. Toisaalta voidaan pyrkiä kasvattamaan biomassan varastoja metsäekosysteemeissä tai puutuotteissa, jolloin varastojen kasvu toimii hiilen nieluna. Keinoja voidaan käyttää myös rinnakkain, mutta varastojen kasvattaminen vähentää biomassan hyödyntämisen potentiaalia ja päinvastoin.

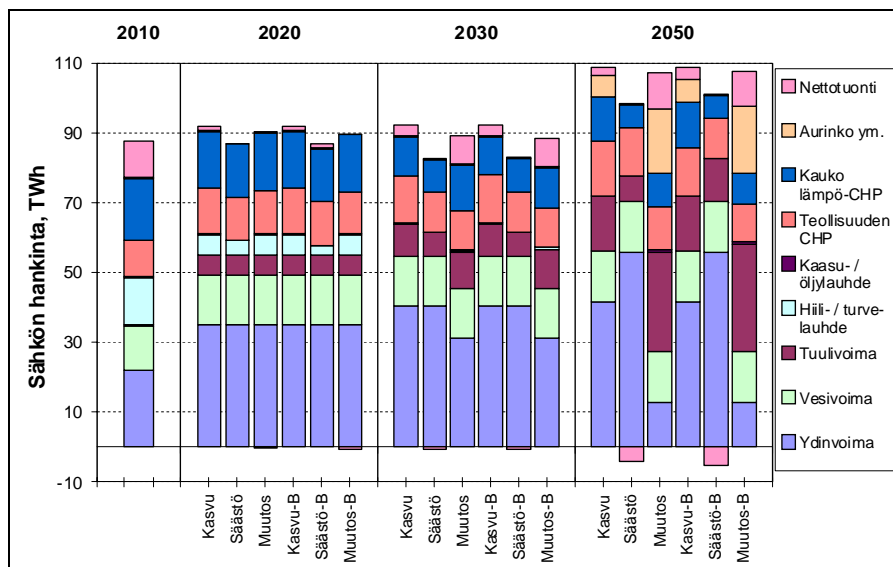
Puun energiakäytössä biomassan hiili vapautuu ilmakehään välittömästi, kun taas metsissä biomassan hajoaminen on hidasta. Metsäenergian käytöstä voidaan siten laskea syntyvän välitön ilmakehää lämmittävä vaikutus, joka saadaan kompensoitua metsän kasvulla vasta pidemmän ajan kuluessa. Puun eri osien hyödyntämisen lämmitysvaikutusta voidaan arvioida dynaamisilla laskentamenetelmillä eripituisten tarkasteluaikavälien aikana, ja se voidaan ilmaista hiilidioksidin päästökertoimiin verrattavissa olevilla GWP-kertoimilla. Bioenergian tuotannon kestävyyttä voidaan siten jossain määrin simuloida asettamalla bioenergian käytölle GWP-kerrointa vastaava päästökerroin, jolloin päästömarkkinoiden hintaohjausmekanismi kohdistuu laskelmissa perustellusti myös bioenergian käyttöön.

Metsähakkeen osalta oksien hyödyntämisen GWP-kertoimeksi on arvioitu 20–30 t(CO₂-ekv.)/TJ sadan vuoden jaksolla, ja siihen perustuen skenaarioiden perustapauksissa käytettiin tässä työssä kaikelle metsähakkeelle kerrointa 25 t/TJ. Pienpuun ja kuitupuun tapauksessa lämmitysvaikutuksen voidaan arvioida olevan lähellä runkopuun päätehakuiden vaikutusta, joksi on arvioitu sadan vuoden aikana noin 65 t/TJ (Pingoud et al. 2012). Koska pien- ja kuitupuun merkitys bioenergian potentiaalista on Suomessa varsin suuri, herkkyystarkasteluna laskettiin kolmen vähähiiliskenaarion tulokset myös käyttämällä tätä kerrointa näille puujakeille. Lisäksi energiakasvien käytölle asetettiin 15 t/TJ lisäpäästökerroin. Herkkyysanalyysissä tarkastellut skenaariot ovat Jatkuva kasvu, Säästö ja Muutos.

Biomassan kestävyyskriteerien simuloinnin vaikutukset sähkön hankintaan on esitetty kuvassa 31. Tuloksissa on merkille pantavaa se, että sähköntuotannossa ei näy merkittäviä muutoksia skenaarioiden perustapauksiin verrattuna. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon määrä pienenee jonkin verran, kun biopolttoaineiden kilpailukyky heikkenee, ja tuulivoiman tuotanto vastaavasti kasvaa, erityisesti Säästö-skenaariossa. Tuulivoiman määrä nousee herkkyytarkastelun kaikissa skenaarioissa yli 12 TWh:n määrään vuonna 2050, ja Muutos-skenaariossa tuotanto nousee nyt jo yli 30 TWh:n.

Myöskään sähkön kokonaiskulutukseen biomassan päästökertoimen aiheuttama kustannusnousu ei juuri vaikuta. Itse asiassa Säästö-skenaariossa sekä kotimainen kulutus että sähkön vienti jopa kasvavat jonkin verran perustapaukseen verrattuna, vaikka bioenergian käyttö väheneekin kaikilla sektoreilla, sähkön ja lämmön tuotanto mukaan lukien. Tämä selittyy sähköistymisen tulemisella entistä kilpailukykyisemmäksi päästöjen vähennyskeinoksi samalla kun biopolttoaineiden kilpailukyky heikkenee.

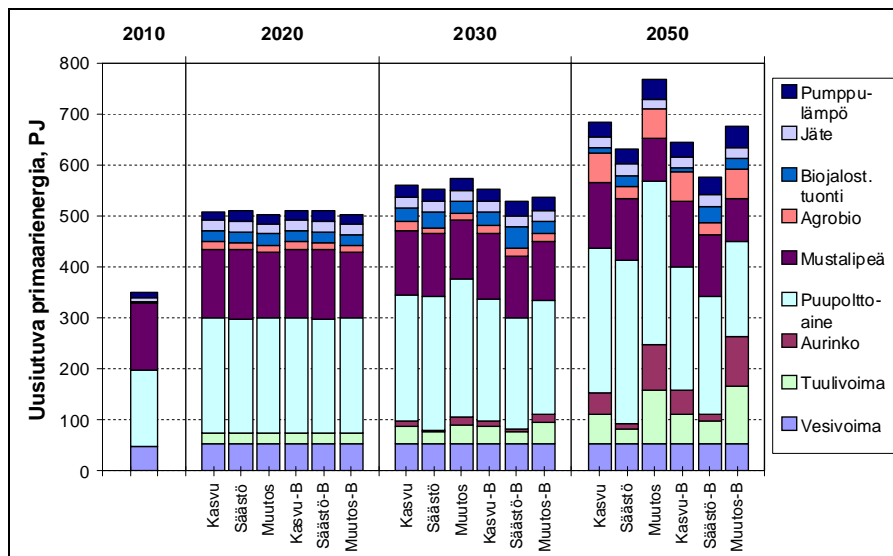
Primaarienergian kulutusrakenteessa bioenergian kestävyyskriteerien simulointi sen sijaan näkyy jo huomattavasti selvemmin. Koko primaarienergian kulutuksesta ei tässä tilanpuutteen vuoksi esitetä tuloksia, mutta uusiutuvan primaarienergian kulutuksen osalta herkkyyksanalyysin tulokset on esitetty kuvassa 32.



Kuva 31. Sähkön hankinnan kehitys bioenergian kestävyyskriteerien herkkyytarkastelussa (B) verrattuna perustapauksiin vuosina 2020–2050.

Kuten kuvasta 32 voidaan selvästi nähdä, puubiomassan kokonaiskäyttö supistuu merkittävästi herkkyyssanalyysin tapauksissa. Pienintä vaikutus on Jatkuva kasvu -skenaariossa, jossa kulutus putoaa vain runsaat 40 PJ vuonna 2050. Säästö-skenaariossa pudotus on kuitenkin jo noin 90 PJ ja Muutos-skenaariossa jopa noin 130 PJ. Vaikutusten erot selittyvät huomattavalta osin biopolttoneiteiden kotimaisella tuotannolla, sillä sen kilpailukykyyn puubiomassan kestävyys näyttää tulosten mukaan vaikuttavan voimakkaimmin. Jatkuva kasvu -skenaariossa liikenteen biopolttoneiteitä tuotetaan jo perustapauksessa selvästi vähemmän kuin Säästö- ja Muutos-skenaarioissa, ja liikenteen päästöjä voidaan vähentää tuntuvasti uusilla ajoneuvotekniikoilla. Sen sijaan Säästö-skenaariossa biopolttoaineet ovat perustapauksessa keskeisin liikenteen päästöjen vähennyskeino, ja Muutos-skenaariossa taas biopolttoneiteet ovat merkittävä vientituote. Lisäksi Jatkuva kasvu -skenaariossa teknologian nopea kehitys lieventää vaikutuksia. Toinen huomattavia vaikutuksia kokeva sektori on tulosten mukaan kiinteistöjen lämmitys, jossa kiinteät biopolttoaineet menettävät merkittävästi kestävyyskriteerien herkkyyssanalyysissä. Niitä korvataan muun muassa sähkökäyttöisillä lämpöpumppuratkaisuilla ja lisätehostustoimilla.

Peltobiomassojen hyödyntämiseen simuloitut kestävyyskriteerit eivät suuremmin tulosten mukaan vaikuta. Kun pienpuulle asetettiin huomattavasti korkeampi lisäpäästökerroin kuin energiakasveille, energiakasvit säilyttävät tulosten mukaan kilpailukykyä, kun bioenergian kilpailukykyinen kokonaistarjonta vähenee pienpuun osalta voimakkaasti.

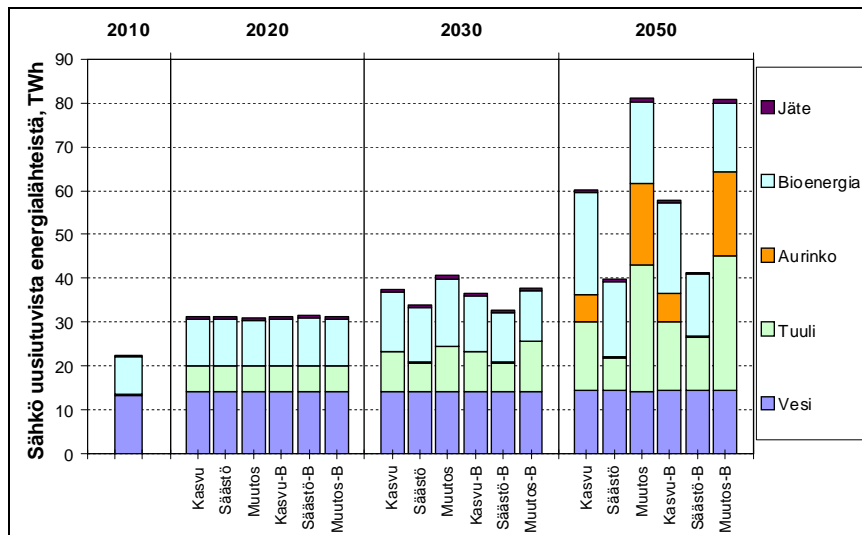


Kuva 32. Uusiutuvan primaarienergian tuotannon kehitys bioenergian kestävyyskriteerillä (B) verrattuna perustapauksiin vuosina 2020–2050.

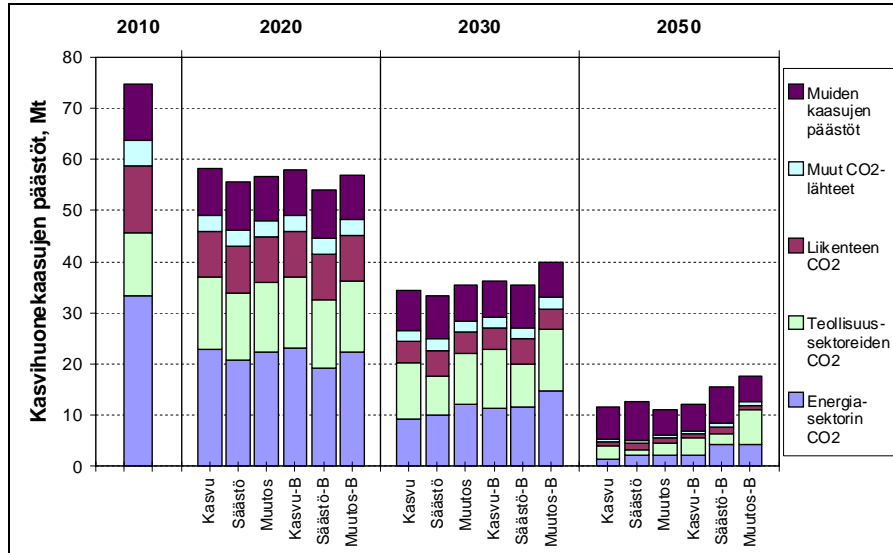
Koska vaikutukset uusiutuvan energian käyttöön ovat erityisen kiinnostavia, kuvassa 33 on esitetty vielä herkkyyksianalyysin tuloksia sähkön tuotannosta uusiutuville energialähteillä. Uusiutuvan sähkön kokonaistuotantoon simuloituilla bioenergian kestävyyskriteereillä ei näytä olevan suurta vaikutusta, sillä bioenergialla tuotetun sähkön väheneminen kompensoituu Säästö- ja Muutos-skenaarioissa tuuli- ja aurinkosähkön tuotannon kasvulla, ja Jatkuva kasvu -skenaariossa uusi teknologia ja vaimentaa bioenergian kilpailukyvyn heikkenemisen vaikutuksia.

Vähähiilisen Suomen tavoitteiden kannalta keskeisimpiä tulossuureita ovat vaikutukset päästöihin sekä päästöjen vähentämisen kustannuksiin. Kuvassa 34 on havainnollistettu biomassan kestävyyskriteerien simuloituja vaikutuksia kotimaisiin kasviuonekaasujen päästöihin. Kuten kuvasta voidaan nähdä, kestävyyskriteerien vaikutukset Suomen päästöihin ovat verrattain pienet, kun koko Euroopan tasolla pidetään kiinni 80 %:n päästöjen vähennyksestä. Vaikutukset osoittautuvat voimakkaimmiksi Muutos-skenaariossa, jossa bioenergian käytön määrällinen vähennys on myös suurin, kuten edellä todettiin. Niinpä Muutos-skenaariossa ei tällöin enää saavuteta vähähiilisen Suomen kansallista 80 %:n vähennystavoitetta.

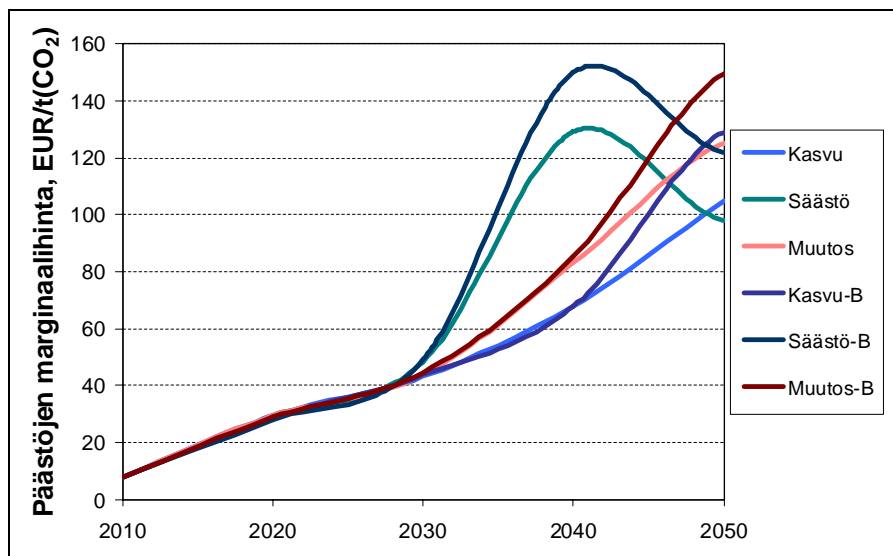
Kuvassa 35 on puolestaan esitetty vaikutukset päästöjen vähentämisen marginaalikustannuksiin eli päästöjen hintaan. Tulosten mukaan oletettujen bioenergian kestävyyskriteerien mukaisten GWP-kertoimien asettaminen nostaisi marginaalihintoja 20–24 % vuonna 2050, ja voimakkaimmillaan vaikutukset olisivat Säästö-skenaariossa. Säästö-skenaariossa haavoittuvuus korostuu vielä skenaariossa oletetun päästövähennysten "etunojan" takia, sillä vuonna 2040 ilmastopoliittikan kustannukset nousisivat Euroopassa jo hyvin korkeiksi.



Kuva 33. Uusiutuvan sähköntuotannon kehitys bioenergian kestävyyskriteerillä (B) verrattuna perustapauksiin vuosina 2020–2050.



Kuva 34. Kasvihuonekaasujen päästöjen kehitys bioenergian kestävyuden herkkyystarkastelussa (B) verrattuna perustapauksiin vuosina 2020–2050.



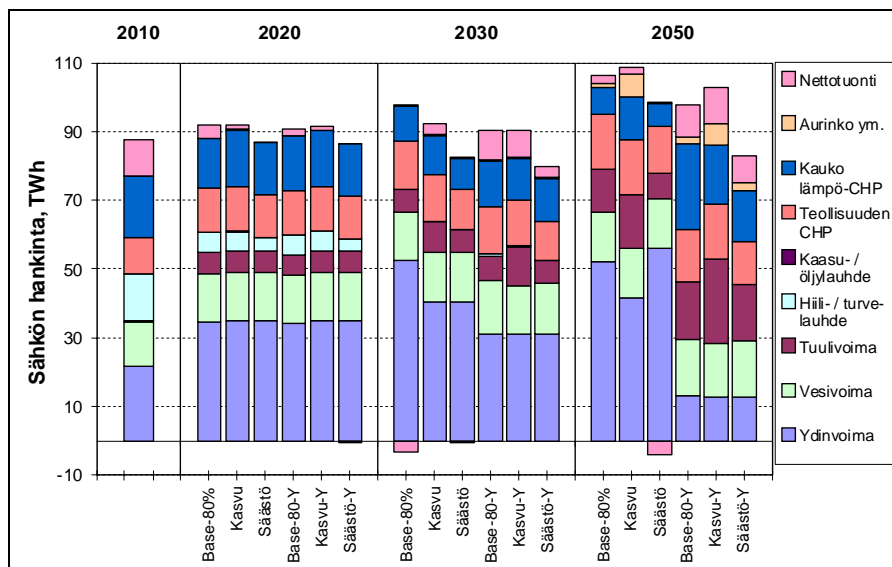
Kuva 35. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen rajakustannuksen kehitys bioenergian kestävyuden herkkyystarkastelussa vuosina 2020–2050.

5.2 Ydinvoiman lisärakentaminen Euroopassa

Ydinvoiman asema tulevaisuuden energiahuollossa jakaa varsin voimakkaasti mielipiteitä niin Suomessa kuin muualla. Euroopassa Japanin Fukushima ydinvoimalaonnettomuus johti muun muassa Saksassa ja Sveitsissä uusien ydinvoimalahankkeiden panemiseen jäihin, ja vanhoille voimalaitoksille myönnettyjen jatkoaikojen perumiseen. Suomalaiset ydinvoimalat ovat kuitenkin toimineet erittäin luotettavasti, ja voimayhtiöt ovat hakeneet lupia uusiin laitoksiin.

Toisena herkkyyksianalysina tarkasteltiin tapausta, jossa uusia ydinvoimalaitoksia ei rakenteilla olevien lisäksi enää rakenneta sen paremmin Suomessa kuin muualla Euroopassa. Suomen osalta tämä tarkoittaa sitä, että rakenteilla olevan Olkiluoto 3 -laitoksen jälkeen uusia laitoksia ei enää rakennettaisi, eli vireillä olleet uudet laitoshankkeet peruuntuisivat. Analyysissa tarkastellut skenaariot ovat Base-80%, Jatkuva kasvu ja Säästö.

Kuvassa 36 on esitetty sähköenergian hankinnan kehitys ydinvoiman lisärakentamisen herkkyyksianalysissä. Kuten voi odottaa ydinvoiman lisärakentamisen jääminen toteutumatta muuttaa tuloksia voimakkaasti muun muassa sähkön ja lämmön yhteistuotannon osalta. Tulosten mukaan yhteistuotannon kilpailukyky ja laajuus paranevat ratkaisevasti, jos uudet ydinvoimalat jäävät toteutumatta. Vaiku-

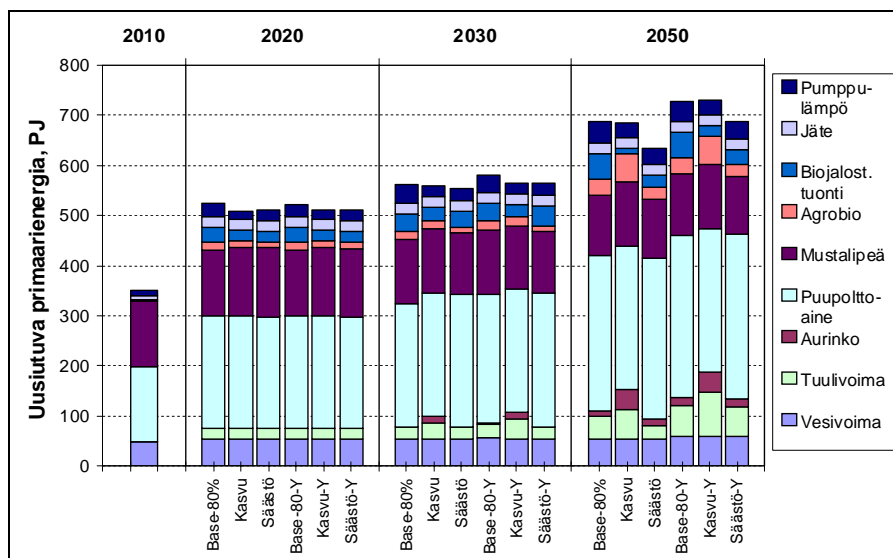


Kuva 36. Sähkön hankinnan kehitys ydinvoiman lisärakentamisen herkkyyksiantalysissa vuosina 2020–2050.

tus on voimakkaimmillaan Base-80%-skenaariossa, jossa yhteistuotannon määrä nousee lähes 40 TWh:n määrään vuonna 2050, kun se perustapauksessa jäi vain noin 24 TWh:n määrään. Toinen merkittävä muutos on sähkön kulutuksen huomattava aleneminen kaikissa kolmessa tarkastellussa skenaariossa. Kulutuksen supistuminen on suurinta Säästö-skenaariossa, jossa se on yli 11 TWh, ja pienin Jatkuva kasvun skenaariossa, jossa vähennystä tulee noin 6 TWh. Kolmas merkittävä muutos on sähkön tuonin merkityksen korostuminen, jolloin omavaraisuus sähkön hankinnassa heikkenee.

Myös tuulivoiman ja minivesivoiman lisärakentaminen tulee entistä laajemmin kannattavaksi jos lisäydinvoimaa ei rakenneta. Tuulivoiman määrä nousee Jatkuva kasvu ja Säästö-skenaarioissa perustapauksesta jopa 9 TWh suuremmaksi, ja vesivoiman kokonaistuotanto nousee kaikissa kolmessa herkkyyksanalyysin skenaariossa noin 16 TWh:n määrään.

Kuvassa 37 on esitetty herkkyyksanalyysissä saadut vaikutukset uusiutuvan energian kokonaiskäyttöön. Tulosten mukaan ilman lisäydinvoimaa uusiutuvan energian kokonaiskäyttö kasvaa vuoteen 2050 mennessä 40–50 PJ perustapauksia suuremmaksi. Vaikutukset yksittäisiin energialähteisiin jäävät tuulivoimaa lukuun ottamatta kuitenkin suhteellisen pieniksi. Esimerkiksi bioenergian hyödyntäminen kasvaa enimmilläänkin vain noin 3 % perustapauksesta. Ehkä hieman yllättävää on myös se, että lisäydinvoiman jääminen toteutumatta ei tulosten mukaan juurikaan vaikuta aurinkoenergian kilpailukykyyn.

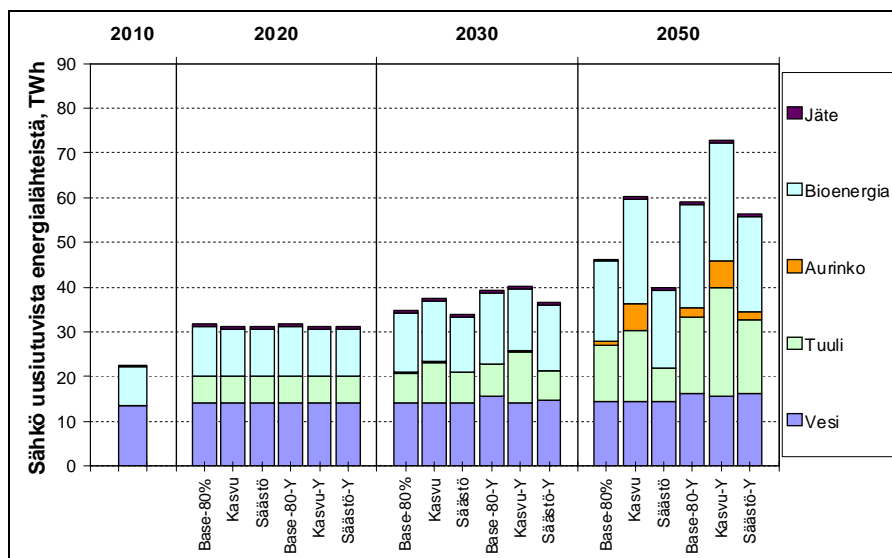


Kuva 37. Uusiutuvan primaarienergian tuotannon kehitys ydinvoiman lisärakentamisen herkkyyksanalyysissä vuosina 2020–2050.

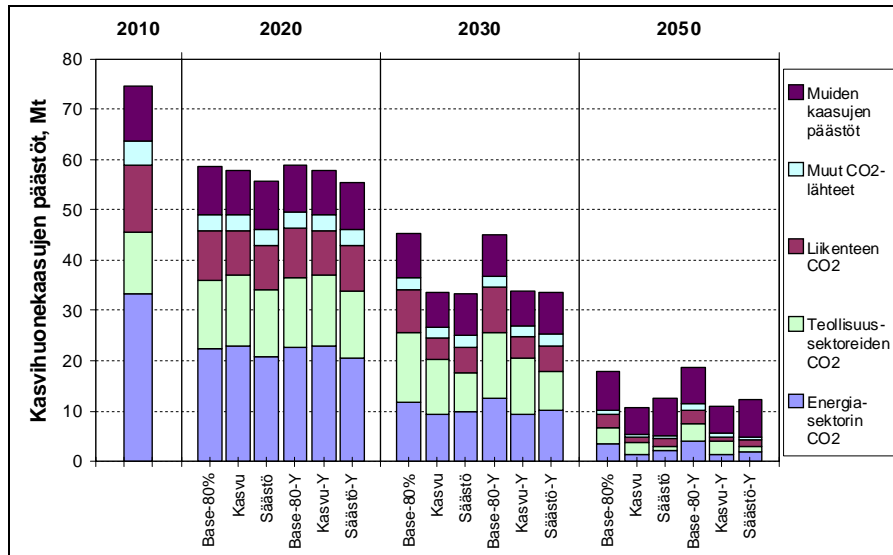
Kuvassa 38 on vielä havainnollistettu uusiutuviin energialähteisiin perustuvan sähköntuotannon muutoksia lisäydinvoiman herkkyyssanalyysissä. Tulosten mukaan ilman lisäydinvoimaa uusiutuva sähköntuotanto kasvaa 13–17 TWh perustapaukseen verrattuna. Vaikka sähkön ja lämmön yhteistuotanto kasvaa reippaasti, uusiutuvan tuotannon suurin lisäys kohdistuu tuulivoimaan. Yhteistuotannon lisäyksestä suuri osa perustuu siten CCS:n hyödyntämiseen suurissa laitoksissa.

Myös aurinkovoiman tuotanto kasvaa hieman Base-80%- ja Säästö-skenaarioissa, mutta sen merkitys jää silti varsin pieneksi sähkön kokonaishankinnassa. Jatkuvan kasvun skenaariossa aurinkovoiman tuotanto itse asiassa pienenee hieman, mikä johtuu sähkön kokonaiskulutuksen vähenemisestä, kun ydinvoimaa ei lisätä. Sähkön kulutuksen väheneminen johtuu sähkön hinnan noususta erityisesti talviaikaan, jonka sähköhuollossa aurinkoenergialla ei ole Suomen olosuhteissa juuri merkitystä ilman varastointiteknologian merkittävää kehitystä. Uusien varastointiteknikoiden merkittävää läpimurtoa oli oletettu vain Muutos-skenaariossa.

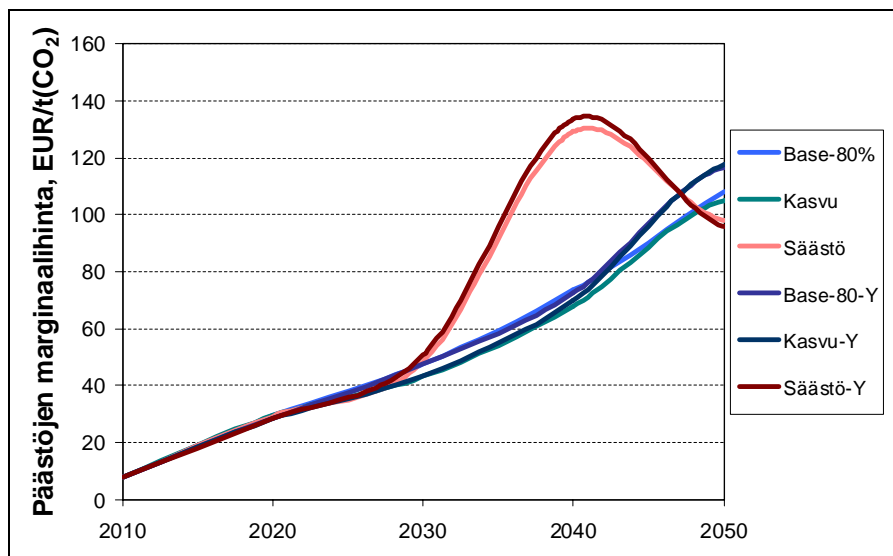
Ydinvoiman lisärakentamisen herkkyyssanalyysin vaikutukset kasvihuonekaasujen päästöihin on esitetty kuvassa 39 ja vaikutuksia päästöjen hintaan on havainnollistettu kuvassa 40. Tulosten mukaan ydinvoiman lisärakentamisen toteutumisella ei ole merkittävää vaikutusta kasvihuonekaasujen päästöihin Suomessa, ja myös vaikutus päästöjen marginaalihintoihin jää varsin pieneksi. Sen sijaan päästöjen vähentämisen kokonaiskustannuksia lisärakentaminen vähentää Suomessa parhaimmillaan 700 M€ vuodessa (Base-80%-skenaariossa vuoden 2040 jälkeen).



Kuva 38. Uusiutuvan sähköntuotannon kehitys ydinvoiman lisärakentamisen herkkyyssanalyysissä vuosina 2020–2050.



Kuva 39. Kasvihuonekaasujen päästöjen kehitys ydinvoiman lisärakentamisen herkkyytstarkastelussa vuosina 2020–2050.



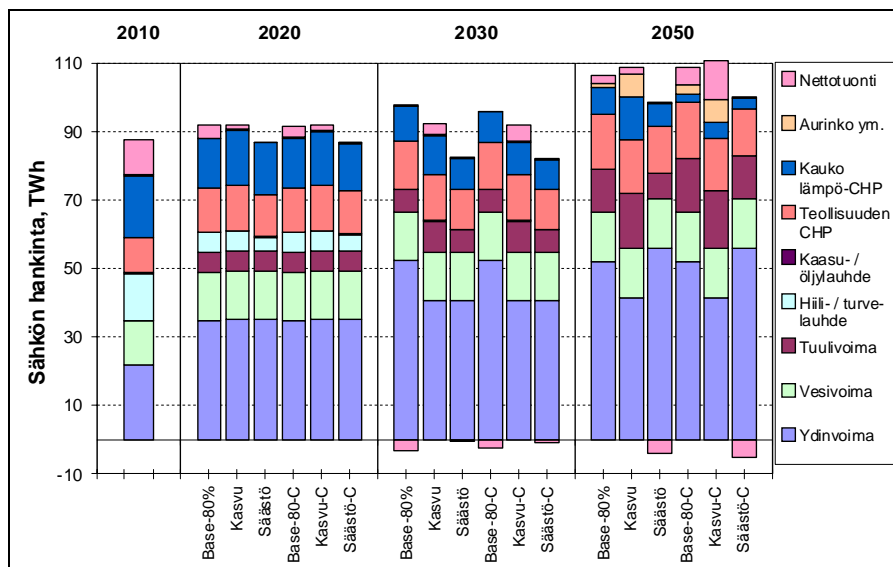
Kuva 40. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen rajakustannuksen kehitys ydinvoiman lisärakentamisen herkkyytstarkastelussa vuosina 2020–2050.

5.3 Laajamittainen CCS:n kaupallistuminen

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) on teknologia, jonka kaupallistukseen laajamittaisesti saattaa saada keskeisen roolin pyrittäessä vähähiiliseen yhteiskuntaan jo vuoteen 2050 mennessä. Vaikka pidemmällä aikavälillä voidaan olettaa uusiutuviin ja muihin lähes hiilineutraaleihin energialähteisiin pohjautuvien tekniikoiden saavan valta-aseman, sitä ennen CCS voi osoittautua taloudelliseksi keinoksi saada aikaan riittävän nopeasti ja voimakkaat päästöjen vähennykset, jotta maapallon lämpenemistä koskevat tavoitteet voidaan saavuttaa. Toisaalta hiilidioksidin laajaan kaupalliseen varastointiin liittyy kuitenkin vielä suuria epävarmuuksia, vaikka talteenoton ja kuljetuksen tekniikka onkin jo koeteltua.

Koska skenaarioiden perustapauksissa CCS saa useissa skenaarioissa varsin merkittävän roolin myös Suomen päästöjen vähentämisessä, kolmantena herkkyyksanalyysinä tarkasteltiin oletusta, että CCS ei laajassa mitassa kaupallistu, vaan sen soveltaminen rajoittuu ainoastaan öljyn ja kaasun tuotannon tehostamiseen, joissa sitä käytetään jo nykyisin.

Kuvassa 41 on esitetty sähköenergian hankinnan kehitys CCS:n herkkyyksanalyysissä. Vuoteen 2030 mennessä perus- ja herkkyystapauksien välillä ei ole suurta eroa, mutta sähkön kokonaiskulutus jää jo tällöin hieman pienemmäksi. Vuonna

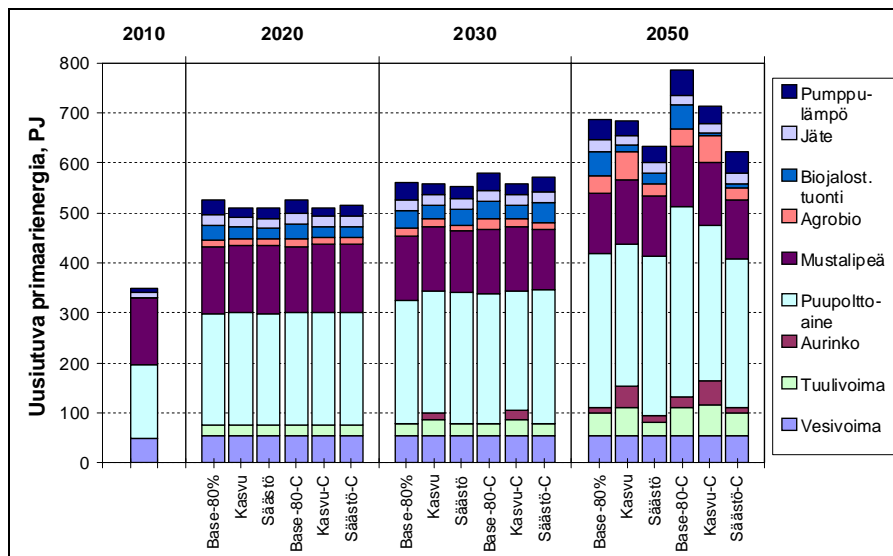


Kuva 41. Sähkön hankinnan kehitys CCS:n kaupallistumisen herkkyystarkastelussa vuosina 2020–2050.

2050 hankintarakenteen erot kasvavat kuitenkin huomattaviksi, erityisesti yhdyskuntien sähkön ja lämmön yhteistuotannon osalta. Kun vähähiiliskenaarioissa päästöjä on vähennettävä rajusti vaikka CCS ei ole käytettävissä, fossiilisia polttoaineita tai turvetta ei enää kannata käyttää juuri lainkaan sähkön ja lämmön tuotantoon. Kun toisaalta bioenergian potentiaali on rajoitettu ja sitä tarvitaan runsaasti myös biopolttonesteiden jalostukseen, kilpailukyisten polttoaineiden saatavuus kaukolämpövoiman tuotantoon supistuu merkittävästi.

Supistuvaa kaukolämpövoiman tuotantoa korvataan pääasiassa sähkön tuonnilla sekä tuulivoiman lisätuotannolla. Sähkön tuonnin merkitys kasvaa erityisesti Jatkuvan kasvun skenaariossa, jossa tuonti nousee perustapauksen 2 TWh:n määrästä noin 11 TWh:n määrään. Base-80%- ja Säästö-skenaarioissa sähkökaupan tase jää paremmaksi, sillä niissä rakennetaan runsaammin lisäydinvoimaa. Vuoden 2030 tuloksissa esiintynyttä sähkön kulutuksen vähenemistä ei sen sijaan enää ilmene vuonna 2050, sillä päästöjen vähentämisen vaikeutumisen myötä kulutus kääntyy tässä vaiheessa sähköistymisen myötä kasvuun.

Kuvassa 42 on esitetty herkkyyksianalysissä saadut vaikutukset uusiutuvan energian kokonaiskäyttöön. Tulosten mukaan ilman CCS:n kaupallistumista uusiutuvan energian kokonaiskäyttö kasvaisi merkittävästi Base-80%-skenaariossa ja lievästi Jatkuvan kasvun skenaariossa, mutta vähenisi lievästi Säästö-skenaariossa. Vaikutusten suunta ei siis ole yksiselitteinen, sillä erityisesti bioenergian kilpailukykyyn CCS:llä voi olla kumpaankin suuntaan vaikuttavia tekijöitä, joiden nettovaiku-

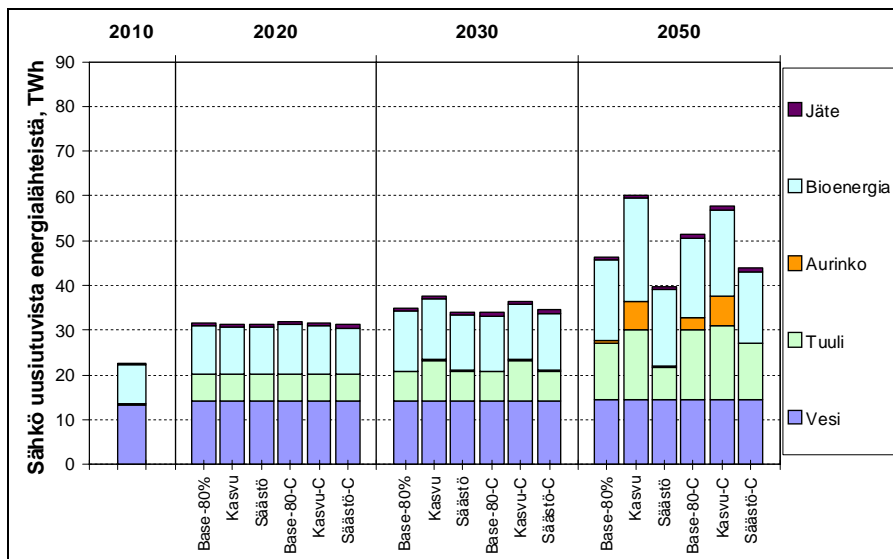


Kuva 42. Uusiutuvan primaarienergian tuotannon kehitys CCS:n kaupallistumisen herkkyystarkastelussa vuosina 2020–2050.

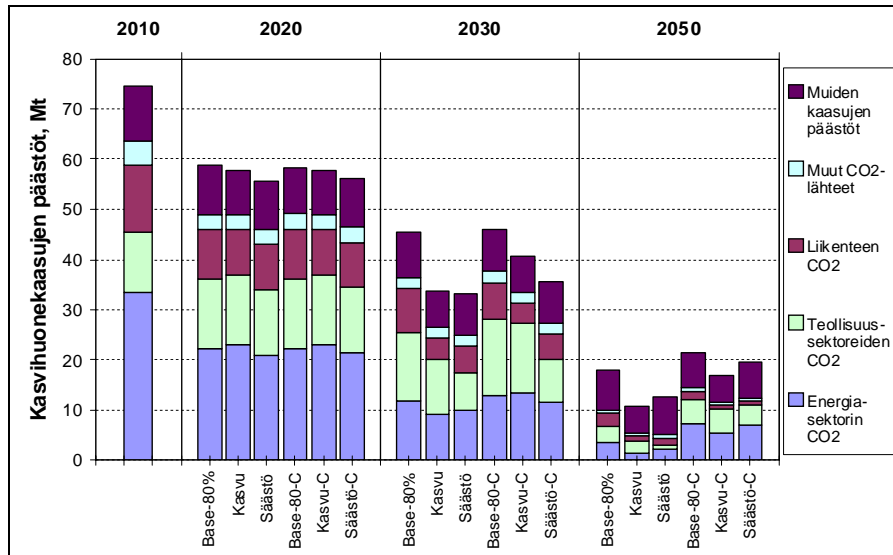
tuksen suunta kytkeytyy muuhun energiajärjestelmän kehitykseen. Säästöskenaarion perustapauksessa bio-CCS:n jääminen keinovalikoiman ulkopuolelle heikentää bioenergian kilpailukykyä enemmän kuin päästötavoitteen tiukentuminen parantaa sitä, mutta Base-80%-skenaariossa tilanne on päinvastainen. Myös sähköntuotannossa CCS:n vaikutukset bioenergian rooliin voivat ilmetä kumpaankin suuntaan, kuten voidaan nähdä kuvasta 43, jossa on esitetty uusiutuviin energialähteisiin perustuvan sähköntuotannon kehitys CCS-herkkyysanalyyseissä.

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin herkkyysanalyysin vaikutukset kasvihuonekaasujen päästöihin on esitetty kuvassa 44 ja vaikutuksia päästöjen hintaan on havainnollistettu kuvassa 45. Tulosten mukaan CCS:n poissulkeminen vaikeuttaa päästöjen vähentämistä Suomessa jopa voimakkaammin kuin EU:ssa keskimäärin, sillä kotimaisten päästöjen määrä jää herkkyystapauksissa huomattavasti suuremmaksi. Mikään kolmesta tarkastellusta skenaariosta ei enää yllä päästöjen 80 %:n vähennystavoitteeseen, joten tulosten perusteella voidaan luonnehtia vähähiilitavoitteen saavuttamisen epäonnistuvan. CCS:n vaikutusta Suomen päästönvähennyksiin selittää nimenomaan BECCS eli bio-CCS, josta mallilaskelmien tulosten perusteella saattaa tulla Suomelle kilpailuetua luova tekijä EU:n ilmasto- ja energiapolitiikassa, mikäli hiilidioksidin varastointipalveluiden markkinat vain syntyvät.

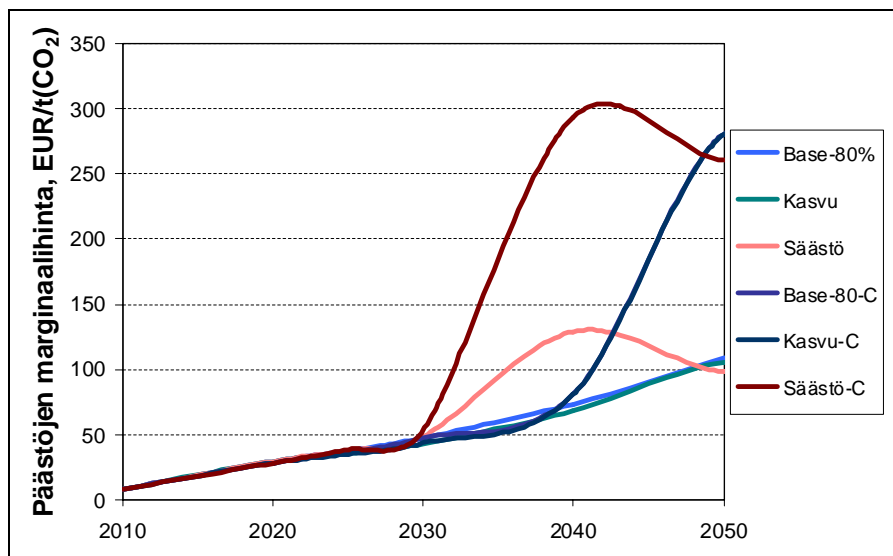
CCS:n merkitystä päästöjen vähentämisen kustannuksiin ja päästökaupan hintojen kehitykseen havainnollistaa kuva 45, jossa on esitetty päästöjen marginaalihinnan kehitys CCS-herkkyysanalyyseissä. Ilman CCS:ää hinnat nousevat tulosten mukaan yli kaksinkertaisiksi vuoteen 2050 mennessä.



Kuva 43. Uusiutuvan sähköntuotannon kehitys CCS:n kaupallistumisen herkkyys-tarkastelussa vuosina 2020–2050.



Kuva 44. Kasvihuonekaasujen päästöjen kehitys CCS:n kaupallistumisen herkkystarkastelussa vuosina 2020–2050.



Kuva 45. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen rajakustannuksen kehitys CCS:n kaupallistumisen herkkystarkastelussa vuosina 2020–2050.

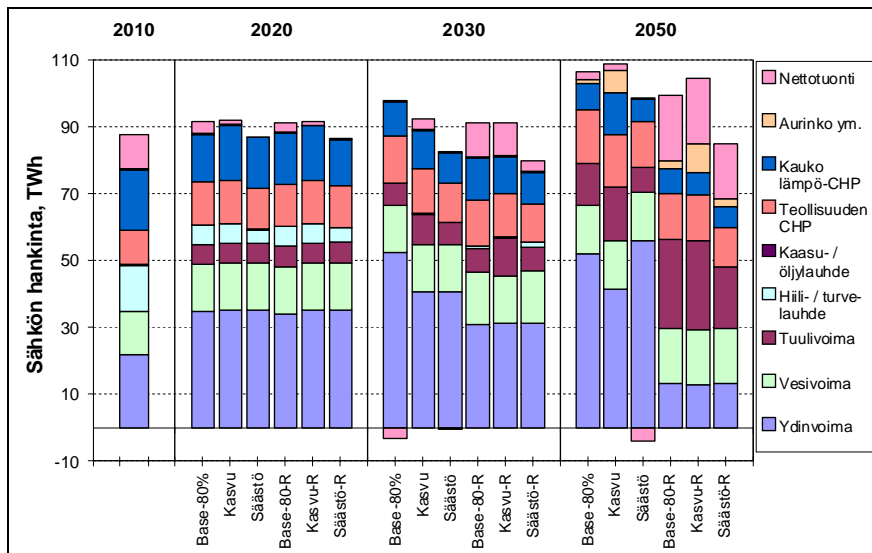
5.4 Kolmen tekijän riskikasauma

Edellä on tarkasteltu skenaariotulosten herkkyyttä kolmen vähähiilitavoitteiden kannalta keskeisen tekijän suhteen, joihin kaikkiin liittyy merkittävää epävarmuutta. Kukin herkkyyksanalyysissä tarkastellusta kolmesta poikkeamasta perustapauksissa käytetyistä oletuksista vaikeuttaa vähähiilitavoitteiden saavuttamista. Vielä kattavamman kuvan saamiseksi tärkeimpien epävarmuustekijöiden vaikutuksista tehtiin lopuksi analyysi myös näiden kolmen riskitekijän yhtaikaisen toteutumisen vaikutuksista.

Viimeisessä herkkyyksanalyysissä tarkastellaan siis kaikkien seuraavien, rinnakkain realisoituvien riskitekijöiden samanaikaisia vaikutuksia:

- Biomassan kestävyyskriteerien käyttöönotto heikentää merkittävästi pientä kuitupuun sekä jonkin verran myös peltobiomassan energiakäytön kilpailukykyä päästöjen vähennyskeinona
- Suomeen ei rakenneta enää uusia ydinvoimalaitoksia Olkiluoto 3:n valmistumisen jälkeen (muualla Euroopassa niitä voi kuitenkin tulla)
- Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi ei kaupallistu laajassa mitassa, vaan sen käyttö rajoittuu öljyn ja kaasun tuotannon tehostamiseen.

Tässä kolmen tekijän riskikasauman herkkyyksanalyysissä tarkastellut skenaariot ovat jälleen Base-80%, Jatkuva kasvu ja Säästö.

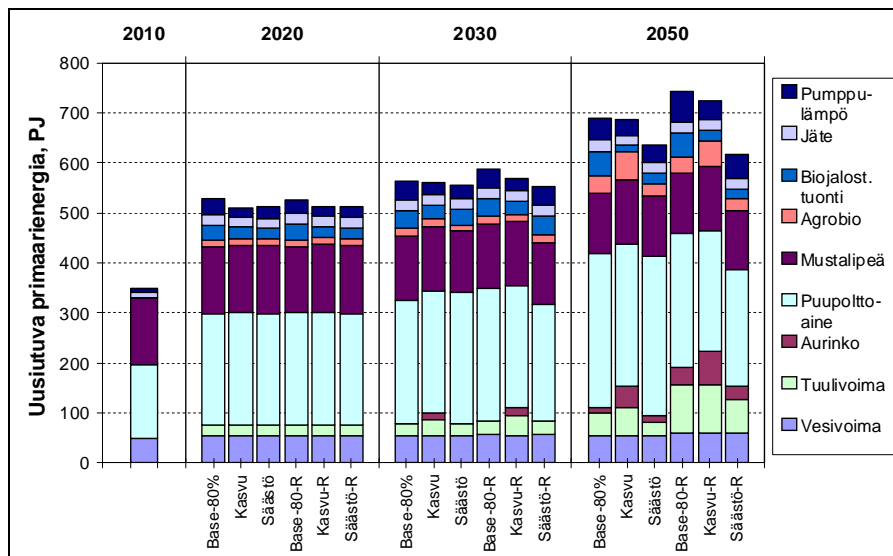


Kuva 46. Sähkön hankinnan kehitys riskikasauman herkkyyksanalyysissä vuosina 2020–2050.

Riskikasauman vaikutukset näkyvät tuloksissa odotusten mukaisesti voimakkaampina kuin tekijöiden vaikutukset erillisinä. Kuvassa 46 on esitetty sähköenergian hankinnan kehitys perus- ja riskikasauman tapauksissa. Sähkön kokonaiskulutus jää jo vuonna 2030 perustapauksia pienemmäksi, ja sähkön tuonnin rooli korostuu oman tuotannon kustannuksella. Vuonna 2050 hankintarakenteen erot kasvavat hyvin merkittäviksi, erityisesti ydinvoimahankkeiden toteutumattomuuden takia mutta myös yhdyskuntien yhteistuotannon kilpailukyvyyn heikkenemisen myötä. Tuulivoiman tuotanto kasvaa voimakkaasti perustapauksiin verrattuna, ja myös vesivoiman oletettu lisäyspotentiaali hyödynnetään lähes täysimääräisesti.

Kun päästöjen kotimaiset vähennyskeinot käyvät riskikasauman toteutuessa vähiin, sähkön tuonnin lisäämisestä tulee merkittävä päästöjen rajoituskeino. Tuonti kasvaa Base-80% ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa oletettuun enimmäismääräänsä, noin 20 TWh:iin vuodessa. Ilman tuonnille asetettua enimmäisrajoitusta kotimainen tuotanto olisi siis supistunut vielä pienemmäksi. Säästö-skenaariossa tullaan toimeen hieman tätä pienemmällä tuonnilla, mutta ero perustapaukseen on siinäkin erittäin suuri. Myös sähkön kulutus pienenee merkittävästi perustapauksiin verrattuna, ja kulutuksen jousto on suurinta Säästö-skenaariossa, jossa se putoaa lähes 10 TWh perustapaukseen verrattuna. Kokonaiskulutus jää tällöin Säästö-skenaariossa vuonna 2050 enää noin 85 TWh:n määrään.

Uusiutuvan energian hyödyntämistä koskevat tulokset (kuva 47) ovat riskikasauman tapauksessa samansuuntaiset kuin CCS:n herkkyysanalyysissä. Bio-

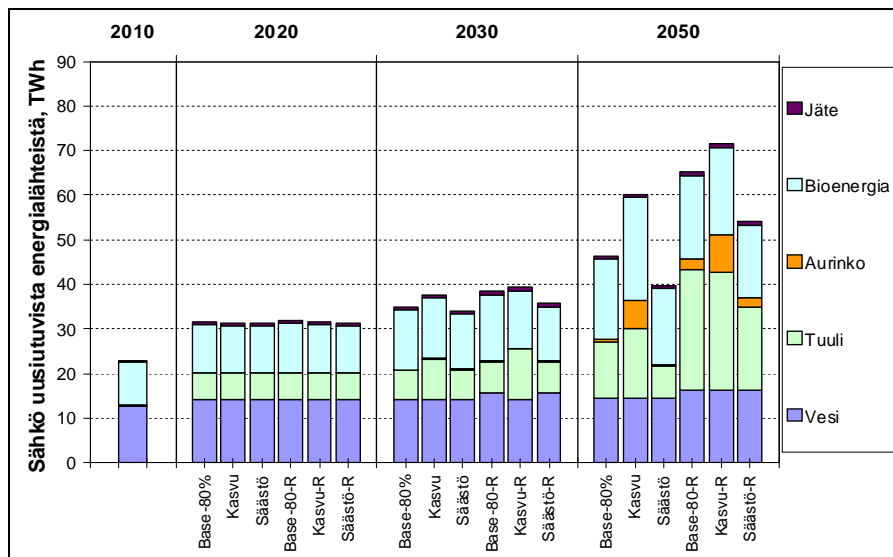


Kuva 47. Uusiutuvan primaarienergian tuotannon kehitys riskikasauman herkkyystarkastelussa vuosina 2020–2050.

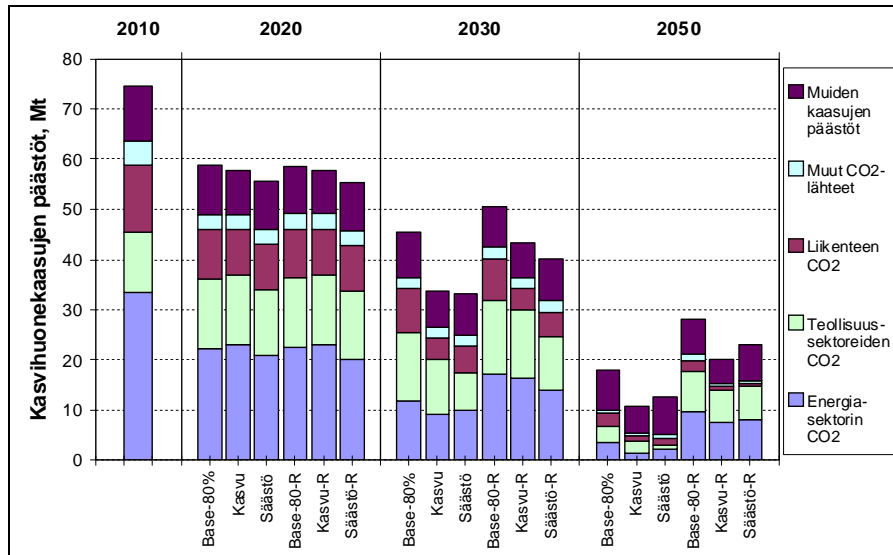
energian hyödyntäminen kasvaa Base-80% ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa, mutta vähenee Säästö-skenaariossa. Erisuuntaisten muutosten taustalla olevat syyt ovat samanlaisia kuin CCS-tapauksessa, mutta nyt bioenergian kilpailukyky heikentävät lisäksi päästökertoimilla simuloidut kestävyyskriteerit. Tuuli- ja aurinkovoiman hyödyntäminen sen sijaan kasvaa kaikissa skenaarioissa voimakkaasti.

Sähkön tuotannossa uusiutuvan energialähteiden hyödyntäminen kasvaa kaikkiaan merkittävästi kaikissa skenaarioissa, vaikka bioenergialla tuotetun sähkön määrä jää Jatkuvan kasvun skenaariossa ja Säästö-skenaariossa hieman perustapaukseen pienemmäksi. Aurinkovoiman tuotanto nousee Jatkuva kasvu -skenaariossa nyt lähelle 10 TWh:n tasoa vuonna 2050, kuten kuvasta 48 voidaan nähdä.

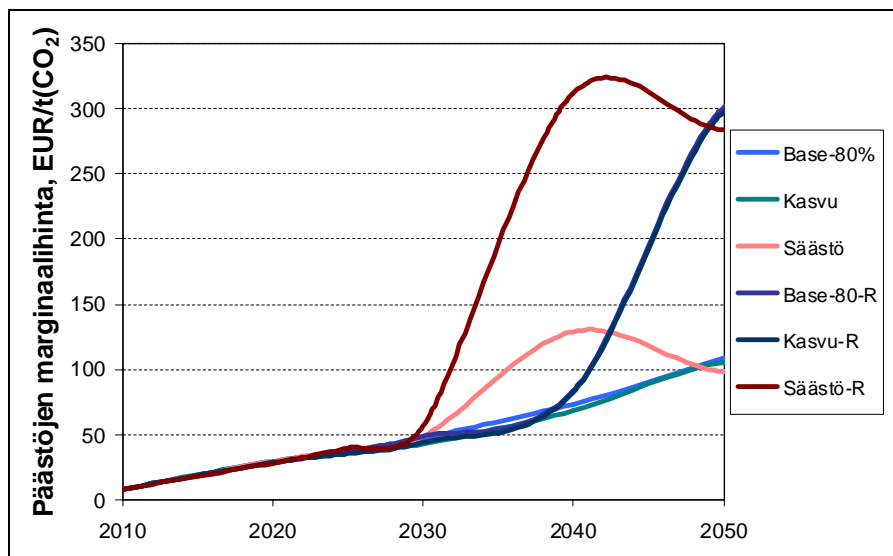
Riskikasauman vaikutukset kasvihuonekaasujen päästöihin on esitetty kuvassa 49 ja vaikutukset päästöjen marginaalihintaan kuvassa 50. Tuloksissa vahvistuvat aiemmassa CCS-tapauksessa esiin tulleet muutokset. Vähähiilitavoitteisiin liittyvien keskeisten riskien toteutuessa epäedulliset vaikutukset ovat Suomessa voimakkaampia kuin Euroopassa keskimäärin, ja Suomessa on siten vaikeampaa saavuttaa yhtä voimakkaita päästöjen vähennyksiä kuin muualla Euroopassa. Päästöjen marginaalihinnat eivät riskikasauman tapauksessa enää ratkaisevasti nouse pelkän CCS-herkkyysanalyysin tuloksista. Hinnat nousevat skenaariolaselmien mukaan vuonna 2050 noin kolminkertaiseksi perustapauksen mukaisista hinnoista, eli suunnilleen tasolle 300 €/t(CO₂-ekv.). Nämä tulokset vahvistavat johtopäätöstä CCS:n mahdollisesta merkittävästä potentiaalista vähähiilisen yhteiskunnan saavuttamiseksi Euroopassa vuoteen 2050 mennessä.



Kuva 48. Uusiutuvan sähköntuotannon kehitys riskikasauman herkkyystarkastelussa vuosina 2020–2050.



Kuva 49. Kasvihuonekaasujen päästöjen kehitys riskikasauman herkkyystarkastelussa vuosina 2020–2050.



Kuva 50. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen rajakustannuksen kehitys riskikasauman herkkyystarkastelussa vuosina 2020–2050.

6. Kriittiset mineraalit ja vähähiiliteknologia

6.1 Kriittisten metallien tarkastelu vähähiiliskenaarioissa

LCFinPlat-hankkeen yksi osatehtävä oli kartoittaa myös energiateknologian kysynnästä maailmanlaajuisesti aiheutuvaa erityismetallien tarpeen kehitystä, kuvaamalla vähähiilisen energiateknologian kannalta keskeisiksi arvioitujen kriittisten metallien kysyntä ja tarjonta globaalissa energijärjestelmässä. Tarkastelut tehtiin yhteistyössä GTK:n kanssa (Kihlman et al 2014).

Tarkasteluun otetut metallit on esitetty taulukossa 9. Monen keskeisen vähähiiliteknologian tuotantoon tarvitaan huomattavia määriä kriittisiä metalleja. Näitä ovat muun muassa aurinkosähkö (sekä aurinkosähköpaneelit että keskittävä aurinkovoima), tuulivoima, polttokennot, elektrolyysi, vetyvarastot, akkuteknologia, uudet ajoneuvotekniikat ja energiaa säästävää valaistusteknologia. Uuden energiateknologian aiheuttama kulutuksen kasvu saattaa siten olla merkittävä, minkä vuoksi näiden metallien kaupallisesti hyödynnettävät resurssit saattavat muodostua yhdeksi vähähiiliteknologian markkinoiden kasvua rajoittavaksi tekijäksi. Työssä laadituista vähähiiliskenaariosta kriittisten mineraalien tarkasteluun valittiin Jatkuva kasvu -skenaario, jossa uuden vähähiiliteknologian kehitys oletettiin nopeaksi.

Suoraan energiateknologiasta johtuva, energiainfrastruktuurin uusimisesta aiheutuva metallien lisätarve lasketaan mallissa tunnettujen metalli-intensiteettien (esim. g/m² tai g/W) ja asennettavan uuden kapasiteetin mukaisesti. Energiateknologian ohella metalleilla on kilpailevia käyttökohteita, joiden osalta kysynnän oletetaan seuraavan talouden yleistä kehittymistä. Joidenkin kriittisten metallien kysyntä on jopa valtaosin energiateknologian kysynnästä riippuva, jolloin mallin tuottama kysynnän kehitysarviota voidaan pitää verraten luotettavana. Tällaisia metalleja ovat muun muassa neodyymi ja praseodyymi, dysprosium ja terbium. Mutta esimerkiksi hopean kysynnästä nykyisin vain alle 10 % johtuu energiateknologiasta.

Metallien tarjonta muodostuu pääosin metallimineraalien louhinnasta ja kierrätyksestä. Louhintaa rajoittavat sekä nykyiset reservit että arvioidut hyödynnettävissä olevat resurssit. Kierrätyksen avulla talteen saadun metallin osuus puolestaan vaihtelee nykyisin suuresti eri metallien välillä, mutta laskentamallissa kaikkien

Taulukko 9. Tarkastellut kriittisten mineraalien metallialkuaineet.

Alkuaine	Symboli	Järjestys- luku	Reservit Gg	Resurssit Gg	Louhinta (2010)	Reservit / louhinta	Resurssit / louhinta
Koboltti	Co	27	7200	25000	82.2	88	304
Yttrium	Y	39	9000	12600	10.5	857	1200
Rutenium	Ru	44	5	5	0.01	417	417
Hopea	Ag	47	594	780	26.0	23	30
Indium	In	49	65	65	0.78	83	83
Telluuri	Te	52	24	48	0.50	48	96
Lantaani	La	57	6000	8400	31.0	194	271
Cerium	Ce	58	41000	49500	42.0	976	1179
Praseodyymi	Pr	59	2000	2800	5.9	339	475
Neodyymi	Nd	60	8000	11200	20.0	400	560
Europium	Eu	63	150	210	0.37	405	568
Terbium	Tb	65	300	420	0.32	938	1313
Dysprosium	Dy	66	480	1098	1.6	300	686
Platina	Pt	78	9	47	0.19	44	245

metallien kierrätyksen tehokkuuden oletettiin paranevan huomattavasti vuoteen 2050 mennessä.

6.2 Skenaariotulokset

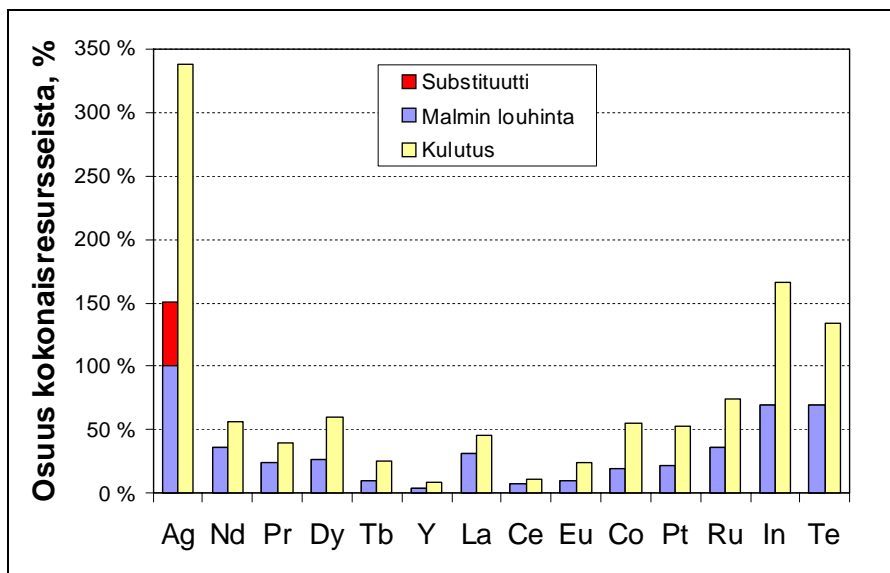
Tuloksia tarkasteltujen kriittisten mineraalien globaalista kulutuksesta ja louhinnasta on havainnollistettu kuvassa 51. Mallilaskelmien mukaan ainakin hopean saattus saattaa muodostua esteeksi uuden energiainfrastruktuurin rakentamiselle. Hopeaa kuluu erityisesti aurinkosähköpaneelissa sekä keskittävässä aurinkovoimassa, mutta myös elektroniikan kautta mm. sähköautoissa. Kumulatiivinen kysyntä vuoteen 2060 saakka on laskelmien mukaan runsaat 2,6 miljoonaa tonnia, mikä on 338 % tunnetuista globaaleista resursseista. Edes pitkälle viety kierrätys ei riitä kattamaan tarvetta, ja sen vuoksi laskentamallissa joudutaan osa kysynnästä kattamaan metallin substituutiolla, kun hopean resurssit on käytetty loppuun. Näin käy siitä huolimatta, että myös hopean ominaiskulutuksissa on huomioitu näköpiirissä olevat mahdollisuudet vähentää metallin tarvetta mallissa kuvatuissa energiatekniikoissa (ks. tarkemmin Grandell 2014).

Tulosten mukaan on suorastaan todennäköistä, että kysynnän kasvaessa hopeasta aiheutuva hintapaine toimii esteenä hopeasta riippuvaisten aurinkosähköteknologioiden kilpailukyvyille. Keskittävän aurinkovoiman kohdalla on mahdollista korvata peilipinnan hopea alumiinilla, mutta tämän yhteydessä peilien reflektiivisyys heikkenee, mikä vaikuttaa CSP-laitoksen kannattavuuteen. Myös ohutkalvopaneelien kohdalla on nähtävissä materiaalien saatavuuteen liittyviä ongelmia, jotka liittyvät erityisesti telluurin ja indiumin varantojen riittävyyteen (Grandell 2014).

Platinaryhmän metalleista ruteenin kumulatiivinen kulutus nousee 74 %:iin varannoista, joista joudutaan kuitenkin oletetun tehokkaan kierrätyksen ansiosta louhimaan vain 36 %. Itse platinan reservit jouduttaisiin hyödyntämään kokonaan, ja tunnetuista resursseista louhittaisiin kaikkiaan 22 %, kun kumulatiivinen kulutus nousee 53 %:iin resursseista. Harvinaisista maametalleista erityisesti kestopagneeteissa käytettävien neodyymin, praseodyymin ja dysprosiumin tarve on huomattava suhteessa tunnettuihin resursseihin, ja vaihtelee 40 % ja 60 % välillä. Kestomagneetteja käytetään muun muassa tuulivoimaloiden generaattoreissa ja sähköautojen moottoreissa, ja niiden tehokas kierrätys on teknisesti täysin mahdollista. Sen sijaan elektroniikkaromun yhteydessä harvinaisten maametallien kierrätys on metallien vähäisestä määrästä johtuen hankalaa. Tästä huolimatta esimerkiksi lantaanin varannot näyttäisivät tulosten valossa riittäville.

Muista tarkastelluista metalleista on syytä mainita vielä koboltti, jota käytetään useiden teknologioiden yhteydessä katalyyttinä (muun muassa polttokennot, elektrolyysi, Grätzel-kennot). Katalyytit ovat teknisesti helposti kierrätettävissä, joten louhinnan tarve jää resursseihin verrattuna melko alhaiseksi (noin 20%), mutta kumulatiivinen louhinta nousee jo noin 70 %:iin kobolttin reserveistä.

Kaikkiaan tulokset viittaavat siihen, että hopean, indiumin ja telluurin kysyntä tulee tarkasteluajavälin aikana olemaan suurinta suhteessa tunnettuihin resursseihin, ja näiden metallien saatavuus saattaa rajoittaa vähähiiliteknologian laajaa käyttöönottoa. Myös platinan tarve ylittää sen reservit, mutta resurssien moninkertaisen määrän vuoksi platinan tarjonnan voi odottaa pysyvän riittävänä.



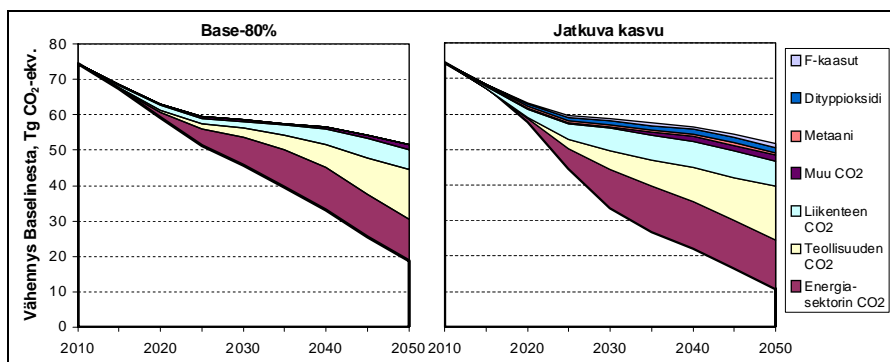
Kuva 51. Kriittisten metallien kumulatiivinen louhinta ja kulutus Jatkuvan kasvun skenaariossa vuosina 2010–2060. Korvaava substituuksi on merkitty punaisella.

7. Johtopäätökset

7.1 Vähähiilitavoitteiden vaikutukset eri sektoreille

Kuvassa 52 on havainnollistettu Suomen kotimaisten päästöjen vähennyksiä Baseline-skenaarioon verrattuna kahdessa vähähiiliskenaariossa (Base-80% ja Jatkuva kasvu). Kuvassa Muu CO₂ sisältää asumisen, palveluiden ja maatalouden hiilidioksidipäästöt. Tuloksista voidaan nähdä selvästi vähähiilitavoitteiden saavuttamiseksi tarvittavien päästöjen lisävähennysten kannalta kaikkein keskeisimmät sektorit, jotka ovat energiantuotanto, teollisuus ja liikenne. Kuvan päästövähen-nykset edustavat kuitenkin vain suorien päästöjen muutoksia, ja niiden lisäksi esimerkiksi asumisen ja palveluiden sektoreilla voidaan saavuttaa energiatehok-kuuden paranemisen myötä merkittäviä välillisiä päästövähenyksiä

Energiantuotannossa sähkön ja kaukolämmön tuotantojärjestelmä voidaan tulosten mukaan saattaa Suomessa 90–100 %:sesti hiilivapaaksi vuoteen 2050 mennessä. Kun otetaan lisäksi huomioon mahdollisuus CCS:n soveltamiseen myös biopolttoaineiden polton päästöihin, energiantuotannon päästötaseessa voidaan päästä jopa negatiivisiin nettopäästöihin. Keskeiset keinot päästöjen vähentämiseen ovat Suomessa bioenergian, sekä ydin- tuuli- ja aurinkoenergian lisäys.



Kuva 52. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset Base-80% ja Jatkuva kasvu - skenaarioissa verrattuna Baseline-skenaarioon.

Yhdyskuntien sähkön ja lämmön yhteistuotannon kilpailukykyä vähähiilitavoitteet kuitenkin heikentävät, sillä biopolttoaineiden riittävyys ja kuljetukset asettavat rajoituksia niiden käytön laajuudelle erityisesti suurten yhdyskuntien yhteistuotannossa. Tätä voidaan kompensoida kuitenkin hyödyntämällä CCS-tekniikkaa, sikäli kuin hiilidioksidin varastointipalveluista tulee kaupallista toimintaa Suomen kannalta riittävän lyhyiden kuljetusetäisyyksien piirissä. Happipolttoon perustuva monipolttoaineteknologia voi tulosten mukaan olla yksi Suomen olosuhteisiin sopiva ja kilpailukykyinen vähähiiliratkaisu suurten yhdyskuntien yhteistuotantoon.

Vaihtelevan tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon osuuden nostaminen yli 25 %:n tuotannosta lisää säätövoiman ja kysynnän ohjauksen tarvetta jo merkittävästi. Tulosten mukaan älykkäillä sähköverkon ohjausjärjestelmillä ja sähkön varastointitekniikoilla Suomessa voitaisiin tuottaa vuoteen 2050 mennessä tuuli- ja aurinkovoimalla jopa 45 % sähkön tarpeesta, vaikkakin tarvittavat investoinnit riittävään tuotantokapasiteettiin olisivat suuria.

Teollisuuden päästöjen vähentäminen on energiantuotantoa vaikeampaa sillä energiaintensiivisen prosessiteollisuuden monille prosesseille on vaikeata löytää taloudellista vähäpäästöistä vaihtoehtoa. Energiatehokkuutta voidaan parantaa vuoteen 2050 mennessä monilla aloilla 20–40 %, mutta se ei vielä riitä syviin päästöjen vähennyksiin. Teollisuuden päästöjen voimakkaaseen vähentämiseen tarvitaan tulosten mukaan myös CCS-tekniikkaa, jotta teräs- tai sementtiteollisuuden tuotanto voisi säilyä Suomessa nykyisenkaltaisiin prosesseihin perustuvana. Metsäteollisuudessa bio-CCS:n soveltaminen massan ja paperin tuotantolaitoksiin integroiduissa biojalostamoissa voi tulosten perusteella muodostua yhdeksi Suomen teollisuuden kilpailueduksi. Myös integroiduilla kaasutusombitekniikoilla on merkittävä potentiaali metsäteollisuuden sähkön ja lämmön yhteistuotannon rakennusasteiden nostamisessa.

Rakennusten energiakäytöstä suorista päästöjä aiheuttaa pääosin kiinteistöjen lämmitys, johon käytetyt fossiiliset polttoaineet voidaan korvata biopolttoaineilla ja siirtymisellä sähköön tai kaukolämpöön. Välillisiä sähkön ja kaukolämmön tuotannon päästöjä voidaan taas rakennussektorilla vähentää parantamalla rakennusten energiategokkuutta. Lisäksi yhdyskuntarakenteen muutoksilla, tehostetulla tilojenkäytöllä sekä älykkäillä järjestelmillä voidaan vähentää paitsi rakennusten energiankulutusta myös lisätä asumiseen liittyvää mukavuutta ja hyvinvointia. Tulosten mukaan vähähiiliskenaarioissa rakennusten suorissa päästöissä voidaan saavuttaa 90 %:n vähennys ja koko rakennuskannan keskimääräisiä ominaiskulutuksia voidaan pienentää parhaimmillaan alle puoleen nykytasosta vuoteen 2050 mennessä. Rakennusten älykkäät ohjausjärjestelmät puolestaan vähentävät niin lämmitysenergian kuin laite- ja valaistussähkön kulutusta ja ovat tärkeä osa älykkäitä sähköverkkoja, joita tarvitaan laajan vaihtelevan uusiutuvan sähköntuotannon integroinnissa tuotantojärjestelmään. Rakennusten energiakäytön kokonaisuhiilitase saadaan selvästi pienimmäksi Jatkuva kasvu ja Muutos-skenaarioissa, joissa uuden teknologian rooli on merkittävin.

Liikennettä pidetään päästöjen voimakkaan vähentämisen kannalta yhtenä haasteellisimmista sektoreista. Vähähiiliyhteiskunnan kannalta yhdyskuntarakenteen kehityksen ohjaaminen entistä tiiviimmäksi mahdollistaisi tehokkaan julkisen liikenteen ja taajamien henkilöautoliikenteen tarpeen vähenemisen. Yhdyskuntarakenteen muutokset ovat kuitenkin väistämättä varsin hitaita, joten ne voivat toimia vain vähähiilitavoitteiden saavuttamiseen tarvittavia teknologisia muutoksia tukevana. Mallilaskelmien tulosten mukaan Suomessa bioenergiaresurssit ovat niin suuret, että liikenteen vähähiilitavoitteet voitaisiin saavuttaa suurelta osin kotimaisiin biopolttoaineisiin perustuvan liikenteen energiankäytön avulla. Joissakin kehityspoluihin biopolttonesteistä voi tulosten mukaan tulla jopa merkittävä nettovientituote. Sähkömoottoreihin tai polttokennoihin perustuva uusi ajoneuvoteknologia voi laajamittaisena kaupallistuessaan merkittävästi vähentää kotimaista biopolttonesteiden tarvetta jo ennen vuotta 2050, mikä luo mahdollisuuden syvempiin kotimaisiin päästönvähennyksiin.

Maataloudessa syvien päästöjä vähennysten aikaansaaminen lienee keskeisimpien päästöjä tuottavien sektoreiden joukossa teknologisesti kaikkein vaikeinta, kuten myös EU:n vähähiilitiekartassa on arvioitu (EU 2011). Tarkastelluista skenaariosta Base-80%, Säästö- ja Pysähdys-skenaarioissa maatalouden päästöjen erot Baseline-skenaarioon johtuvat pääasiassa eroista maataloustuotannon kehitystä koskeissa oletuksissa. Varsinaisten päästövähennystoimien kilpailukyky jää näissä skenaarioissa maatalouden piirissä suppeaksi, vaikka pieniä vähennyksiä saadaan muun muassa biokaasutuksen käytön laajenemisella. Ainoastaan Jatkuva kasvu ja Muutos-skenaarioissa maataloudessa kyetään näkyvästi vähentämään myös kotieläinten ruoansulatuksen päästöjä ja maaperän N₂O päästöjä, luvussa 3.8 mainituin keinoin. Tuotannon supistuminen on silti näissä skenaarioissa merkittävin päästöjä vähentävä tekijä. Vuoteen 2010 verrattuna maatalouden päästöjen vähennykset ovat korkeimmillaan 44 % vuonna 2050 (Muutos-skenaario), mikä on sopusoinnussa EU:n vähähiilitiekartan arvioiden kanssa.

Muita huomattavia päästölähteitä edellä mainittujen sektoreiden ohella ovat vielä muun muassa **jätehuolto ja F-kaasujen lähteet**. Jätehuollossa metaanipäästöjen vähentäminen toteutuu suurimmaksi osaksi jo perusskenaariossa, jossa on huomioitu orgaanisen ja muun biohajoavan jätteen kaatopaikkasijoittamisen EU-tasoinen rajoitus vuodesta 2016. Vähähiiliskenaarioiden lisävähennykset jäävät verrattain pieniksi. Myös F-kaasujen päästöt alenevat jo Baseline-skenaariossa tuntuvasti, sillä huomattava osa vähennyspotentialista on verrattain edullista.

7.2 Vähähiilipolkujen haasteet ja mahdollisuudet

Skenaariotulokset osoittavat, että Suomen oma tavoite 80 %:n päästöjen vähennyksistä on saavutettavissa, jos skenaarioiden perustapauksien oletusten mukainen kehitys ilmastopolitiikassa sekä teknologian kehityksessä ja kaupallistumisessa toteutuu. Tulosten mukaan Jatkuvan kasvun skenaario, jossa on oletettu verrat-

tain nopea uuden teknologian kehittyminen ja käyttöönotto, johtaa vähähiiliskenaarioista kaikkein alimpiin päästöihin Suomessa. Erot Säästö- ja Muutosskenaarioon eivät kuitenkaan ole päästöjen osalta suuret, ja vähähiilitavoite saavutetaan niissä kaikissa. Base-80%-skenaarion tulokset viittaavat siihen, että ilman merkittävää panostusta vähähiiliteknologiaan tai energian käytön tehostamiseen Suomen voi olla vaikea saavuttaa kansallista vähähiilitavoitetta. Energian loppukulutus vähenee kaikissa vähähiiliskenaarioissa, mikä heijastaa energian käytön tehostumisen merkittävää roolia tavoitteiden saavuttamisessa.

Herkkyysanalyysien tulokset vahvistavat johtopäätöstä uuden teknologian merkityksestä vähähiilitavoitteen saavuttamiseen. Jatkuva kasvu -skenaarion tulokset osoittautuivat kaikissa tapauksissa vähiten herkiksi vähähiilitavoitteen saavuttamisen keskeisille riskitekijöille. Se oli ainoa skenaario, jossa ilman CCS:n kaupallistumistakin Suomi saavuttaisi noin 80 %:n päästöjen vähennystavoitteen.

Energian ja erityisesti sähkön hinnan kehitys on yksi keskeisistä Suomen energiaintensiivisen teollisuuden kilpailukykyyn vaikuttavista tekijöistä. Skenaarioiden perustapauksissa sähkön hinta nousee enimmillään noin 40 % vuoden 2010 tasosta, mikä voi vaikuttaa jo merkittävästi teollisuuden kilpailukykyyn. Vähäisimmäksi nousu jää Jatkuvan kasvun skenaariossa, jossa se on runsaat 20 %, ja suurin nousu on Base-80% ja Pysähdys-skenaarioissa. Myös Säästö-skenaariossa hinnannousu jää kohtuulliseksi. Uuteen teknologiaan panostamisella on siten tulosten mukaan edullinen vaikutus myös sähkön hintaan. Herkkyysanalyysien tulosten mukaan lisäydinvoiman vaikutus sähkön hintakehitykseen on kaikissa tapauksissa tuntuva, ja erityisesti vaikutus näkyy Base-80%-skenaariossa, jossa sähkön hinta nousee ilman lisäydinvoimaa vielä 25 % perustapausta korkeammalle tasolle. Kolmen riskitekijän yhdistelmän tapauksessa sähkön hinta nousee Base-80%-skenaariossa jopa 90 % vuoden 2010 tasosta, mutta Jatkuvan kasvun skenaariossa nousu jää 50 %:n paikkeille ja Säästö-skenaariossa 60 %:n tasolle.

Uusiutuvan energian osuus nousee suurimmaksi Muutos-skenaariossa, jossa sen määrä nousee vuonna 2050 yli kaksinkertaiseksi vuoden 2010 tasosta. Tämä juontuu kuitenkin ydinvoiman pienimmästä osuudesta, ja jos tarkastellaan hiilineutraalin energian kokonaisuutta, eniten ydinvoimaa tuottava Säästö-skenaario saavuttaa korkeimman tason. Erot eri vähähiiliskenaarioiden välillä jäävät kuitenkin pieniksi, sillä niissä kaikissa hiilineutraalin energian osuus nousee 75–80 %:iin loppukulutuksesta, kun vuonna 2010 osuus oli noin 50 %. Kaikissa skenaarioissa bioenergia pysyy Suomen tärkeimpänä uusiutuvana energialähteenä, jonka varannot tarjoavat monia mahdollisuuksia bioenergian jalostukseen, bioenergiaa hyödyntävän uuden teknologian kehittämiseen ja teknologian vientiin.

Uusiutuvan ja muun hiilineutraalin energian osuuden kasvu heijastuu varsin suoraan myös energiaomavaraisuuteen, joka paranee kaikissa vähähiiliskenaarioissa. Toinen tapa omavaraisuuden tarkastelemiseksi on energian tuontilaskun eli polttoaineiden ja sähkön kokonaistuonnin ja viennin erotuksen nettoarvon kehitys.

Tulosten mukaan tuontilasku laskee kaikissa vähähiiliskenaarioissa noin vuoteen saakka 2040, ja tuntuvinta lasku on Jatkuva kasvu ja Säästö -skenaarioissa, joissa se suunnilleen puolittuu. Base-80%-skenaariossa tuontilasku kääntyy vuoden 2040 jälkeen tuontilasku kääntyy nousuun ja kohoaa lähes vuoden 2010 tasolle.

Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia koskevat tulokset skenaarioiden perustapauksissa ja herkkyyssanalyseissa osoittavat, että CCS:llä voi kaupallistuessaan olla sekä koko Euroopassa että Suomessa merkittävä rooli vähähiilitavoitteiden saavuttamisen aiheuttamien lisäkustannusten pitämiseksi kurissa. Päästöjen vähentämisen marginaalikustannukset nousisivat tulosten mukaan voimakkaasti, mikäli CCS ei kaupallistu edes varovaisessa mittakaavassa, lähinnä merialueiden entisten öljy- ja kaasukenttien tarjoaman varastointipotentiaalin varassa. Suomen kannalta CCS saattaa myös tarjota bioenergian laajamittaiseen käyttöön liittyvää kilpailuetua bio-CCS:n soveltamisessa. Huomattavien puuperäisten biomassaresurssien ansiosta Suomessa on merkittävä potentiaali toisen sukupolven biojalostamoille, joihin hiilidioksidin talteenotto voidaan erityisen edullisesti liittää. Voidaan kuitenkin myös arvioida, että laskentamalli todennäköisesti yliarvioi CCS:n vaikutusta päästöjen vähentämisen rajakustannuksiin vuonna 2050, sillä näin pitkällä aikavälillä on odotettavissa myös teknologiamurroksia, joita mallilaskelmassa ei ole kyetty ottamaan huomioon.

Kaikkiaan herkkyyssanalyysin tulokset antavat vahvoja viitteitä siitä, että uuden teknologian kehityksellä ja käyttöönoton edistämällä voidaan merkittävästi pienentää vähähiilitavoitteiden saavuttamisen riskejä ja toisaalta luoda mahdollisuuksia suomalaisen energiateknologian ja biojalosteiden viennille. Tätä osoittavat erityisesti Jatkuvan kasvun skenaariota koskevat tulokset, joissa merkittävien riskien, kuten uusien bioenergian kestävyyskriteereiden käyttöönotto, lisäydinvoiman jääminen toteutumatta sekä CCS:n kaupallistumisen epäonnistuminen johtivat pienimpiin muutoksiin monissa Suomea koskevissa keskeisissä tuloksissa, muun muassa päästöjen vähennyksissä, bioenergian kilpailukyvyssä ja sähkön hintatason nousussa.

Myös radikaaleimpia teknologisia muutoksia sisältävä Muutos-skenaario, jonka tulokset poikkesivat muista skenaarioista voimakkaasti muun muassa aurinkoenergian huomattavan aseman suhteen, näyttäytyi skenaarioanalyysissa varsin lupaavana vähähiilipolkuna. Tämän skenaarion osalta on kuitenkin muistettava, että siinä visioitu nopea ja laajamittainen uuden teknologian läpimurto, tarvittavat suuret investoinnit uuteen energiainfrastruktuuriin ja koko Suomen talouden rakenteen voimakas muuttuminen sisältävät tarkastelluista skenaarioista ilmeisesti lopulta kaikkein laajakantoisimpia epävarmuuksia. Yksi erityisesti aurinkoenergian hyödyntämisen nopeaan laajenemiseen liittyvä lisäepävarmuus ilmeni globaalissa mallitarkastelussa, jonka mukaan kriittisten metallien tarve saattaa muodostua aurinkoenergiatekniikan markkinoiden kasvua rajoittavaksi tekijäksi. Muutos-skenaarioiden keskeinen oletus myös oli, että ihmisten arvot ja asenteet muuttuvat merkittävästi ilmastomyönteisimmiksi, niin Suomessa kuin globaalistakin.

Lähdeluettelo

- Airaksinen, M. & Vainio T. 2012. Rakennuskannan korjaamisen ja kunnossapidon energiantehokkuustoimenpiteiden vaikuttavuuden arviointi energiansäästön, CO₂-ekv.päästöjen, kustannuksien ja kannattavuuden näkökulmista. VTT Tutkimusraportti VTT-CR-00426-12.
- ETSAP 2012. Electricity Storage. IEA-ETSAP and IRENA Technology Policy Brief E18 – April 2012.
- EU 2011. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Bussels: European Commission.
- EU 2013. EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050. Reference scenario 2013. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- EurObserv'ER 2013. The State of Renewable Energies in Europe. Edition 2013.
- Grandell L. 2014. Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa. VTT Technology 162. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T162.pdf>
- Hannula, I. & Kurkela, E. 2013. Liquid transportation fuels via large-scale fluidisedbed gasification of lignocellulosic biomass. VTT Technology 91. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T91.pdf>
- IEA 2011. Combining Bioenergy with CCS. Reporting and Accounting for Negative Emissions under UNFCCC and the Kyoto Protocol. Paris: International Energy Agency.
- IEA 2013. Nordic Energy Technology Perspectives 2013. Pathways to a Carbon Neutral Energy Future. Pariisi: International Energy Agency. www.iea.org/etp/nordic
- IPCC 2007. Policies, Instruments and Co-operative Arrangements. Teoksessa: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R. & Meyer, L.A. (toim.), Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IRENA 2013. Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview. International Renewable Energy Agency.
- Kallio, M., Salminen, O. & Sievänen, R. 2014. Low Carbon Finland 2050 -platform: Skenaariot metsäsektorille. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos.

- Kihlman, S., Lauri, L., Vuori, S. & Tuusjärvi, M. 2014. Kriittisten metallien ja mineraalien maailmanlaajuinen tuotanto ja malmipotentiali Suomessa, sekä Suomen metallikaivosteollisuuden mahdolliset kehityspolut matalahiilissä yhteiskunnassa. Low Carbon Finland 2050 -platform. Julkaistaan GTK:n julkaisusarjassa.
- Koljonen T. & Similä, L. (eds.). 2012. Low carbon Finland 2050. VTT clean energy technology strategies for society. VTT Visions 2. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2012/V2.pdf>
- Lindroos, T. J., Hast, A., Ekholm, T. & Savolainen, I. 2011. Arvio epäpäästökauppasektorin päästövähennyskeinoista ja kustannuksista Suomessa. Espoo: VTT, VTT Tiedotteita – Research Notes 2605. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2605.pdf>
- Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtilä, A. & Goldstein, G. 2005. Documentation for the TIMES Model. Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP).
- Loulou, R. 2008. "ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part II: Mathematical formulation". Computational Management Science, Vol. 5, Issue 1–2, s. 41–66.
- Loulou, R. & Labriet, M. 2008. "ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure". Computational Management Science, special issue on Energy and Environment, Vol. 5, No 1–2, s. 7–40.
- Pahkala, K & Lötjönen, T. (toim.) 2012. Peltobiomassat tulevaisuuden energiare-surssina. MTT Raportti 44.
- Pasonen, R., Mäki, K., Alanen, R. & Sipilä, K. 2012. Arctic solar energy solutions. VTT Technology 15. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T15.pdf>
- Pingoud, K., Ekholm, T. & Savolainen, I. 2012. Global warming potential factors and warming payback time as climate indicators of forest biomass use. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 17, s. 369–386.
- Regina, K., Lehtonen, H., Palosuo, T. & Ahvenjärvi, S. 2014. Maatalouden kasvi-huonekaasupäästöt ja niiden vähentäminen. MTT Raportti 127.
- Scialabba, N. E. & Müller-Lindenlauf, M. 2010. Organic agriculture and climate change. Renewable Agriculture and Food Systems 25(2), s. 158–169.
- Teir, S., Arasto, A., Tsupari, E., Koljonen, T., Kärki, J., Kujanpää, L., Lehtilä, A., Nieminen, M. & Aatos, S. 2011. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa. VTT Tiedotteita – Research Notes 2576. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2576.pdf>

- TEM 2010. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa vuonna 2020. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto 66/2010.
- TEM 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Taustaraportti. Työ- ja elinkeinoministeriö, 21.3.2013. https://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen_energia-_ja_ilmastostrategia_taustaraportti.pdf
- Tilastokeskus 2013. Greenhouse gas emissions in Finland. National Inventory Submission 15 Apr 2013.
- Tilastokeskus 2014. Tilastotietokannat – Energia/Energian hankinta ja kulutus Uusiutuvien energialähteiden osuus energian loppukulutuksesta. <http://193.166.171.75/database/statfin/ene/ehk/ehk.fi.asp>
- Tuominen, P., Holopainen, R., Eskola, L., Jokisalo, J. & Airaksinen, M. 2014. Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. Building and Environment 75, 153–160.
- Tuusjärvi, M., Mäenpää, I., Vuori, S., Eilu, P., Kihlman, S. & Koskela, S. 2013. Arvio Suomen kaivannaistoiminnan kehityksestä vuosiin 2020 ja 2030. Espoo: Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 200.
- Vainio, T., Belloni, K., Jaakkonen, L. 2012. Asuntotuotanto 2030 – asuntotuotantotarpeeseen vaikuttavia tekijöitä, VTT, Espoo. VTT Technology 2. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T2.pdf>
- Vesirakentaja 2008. Voimaa vedestä 2007. Selvitys vesivoiman lisäämismahdollisuuksista. Oy Vesirakentaja, 2008.

Title	Low Carbon Finland 2050 -platform Energy system pathways towards a low carbon society
Author(s)	Lehtilä, A., Koljonen, T. et al.
Abstract	<p>Initiatives of developing roadmaps for moving to a low carbon economy by 2050 have been taken by many European authorities, including the European Commission. Using the ETSAP TIMES modeling framework as the central tool, we analyse the implications of low carbon policies within Europe, with a special focus on the Finnish energy system. The main objective of the work in the Low Carbon Finland 2050 -platform project was to identify cost-effective and robust pathways for moving into a low carbon economy by 2050, by creating a set of different scenarios for the future society and economy. The report outlines the work carried out with the VTT TIMES model, which is a global partial equilibrium techno-economic energy systems model. On the global level, the analysis considers also the energy system impacts on the depletion of known mineral resources for critical high-tech metals, many of which are closely associated with the key energy technologies of the future.</p> <p>The work builds on the prior work of Koljonen and Similä (2013), but presents a further elaboration of the different storylines and pathways to a low carbon economy. In the different pathways not only the technology portfolios are changed but also the structure of the whole economy, including substantial changes in the Finnish energy intensive industries, community structures, and even consumer behaviour.</p> <p>The sensitivities to uncertainties in the energy system's development with respect to key technologies and energy sources are also assessed with the help of the TIMES model. Such key sensitivity parameters include agreements on global climate policies, the viability and potential role of carbon capture and storage, sustainability of biomass resources, and the future of nuclear power in Europe. Taking into account these uncertainties, the low carbon pathways are characterised with respect to their strengths, weaknesses, opportunities and threats.</p> <p>Achieving the targets for a low carbon economy is technically feasible under many different technology pathways. However, the results clearly indicate that the transition can occur most smoothly and with lowest impacts on the economies when a reasonably high diversity in the energy supply system is maintained. That would imply also the need for employing CCS, both within the energy sector and energy intensive process industries. Bioenergy remains the most important renewable energy source in all scenarios. The analysis indicates that a very high reliance on non-biomass renewables would require rapid technological development with a break-through in energy storage technology, and would entail considerable uncertainties with respect to both economy and technology.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7439-1 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Online)
Date	November 2014
Language	Finnish, English abstract
Pages	91 p.
Name of the project	Low Carbon Finland -platform
Commissioned by	Tekes – the Finnish Funding Agency for Innovation
Keywords	energy systems, models, scenarios, low carbon, climate policy
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. +358 20 722 111

Nimeke	Low Carbon Finland 2050 -platform Energiajärjestelmien kehityspolut kohti vähähiilistä yhteiskuntaa
Tekijä(t)	Lehtilä, A., Koljonen, T. et al.
Tiivistelmä	<p>Globaali ilmastonmuutoksen hillintä ja ilmakehän lämpötilan nousun rajoittaminen edellyttää maailman kasvihuonekaasupäästöjen radikaalia vähentämistä. Teollisuusmaiden osalta edellytetään 80–95 %:n vähennyksiä vuoden 1990 päästötasoon verrattuna, mikä on lähtökohtana myös EU:n julkaisemassa vähähiilitekkarissa. Low Carbon Finland 2050 -platform -hankkeessa analysoitiin VTT:n TIMES-energiajärjestelmämallin avulla vähähiiliseen yhteiskuntaan tähtäävän politiikan vaikutuksia Euroopassa pitäen Suomen energiajärjestelmää tarkastelun keskipisteenä. Keskeisenä tavoitteena oli tunnistaa kustannustehokkaita ja robusteja polkuja vähähiilisen yhteiskunnan saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä, minkä pohjaksi luotiin joukko vaihtoehtoisia skenaarioita talouden ja yhteiskunnan tulevaisuuden kehitykselle. Globaalilla tasolla tarkasteltiin myös uuteen teknologiaan tarvittavien kriittisten metallimateriaalien tunnettujen varantojen riittävyttä.</p> <p>Työ oli osittain jatkoa aiemmalle VTT:n Low Carbon Finland 2050 -hankkeelle, mutta tässä työssä skenaarioita ja niihin liittyviä vähähiilipolkuja on käsitelty huomattavasti tarkemmin ja monipuolisemmin. Kunkin skenaarion taustalla olevat oletukset on laadittu johdonmukaisesti ns. skenaariotarinan mukaisesti niin teknologian, kansantalouden ja yhdyskuntarakenteen kehityksen osalta. Vaihtoehtoisien kehitysarvioihin sisältyy myös oletuksia merkittävistä muutoksista Suomen teolliseen rakenteeseen, yhdyskuntien kehitykseen ja kuluttajien käyttäytymiseen.</p> <p>Myös vähähiilitavoitteiden saavuttamisen kannalta merkittävimpien epävarmuuksien vaikutusta energiajärjestelmän kehityspolkuihin arvioitiin järjestelmämallin avulla. Keskeisimpinä epävarmuustekijöinä tarkasteltiin hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kaupallistumista, bioenergian kestävyyskriteerien vaikutuksia ja ydinvoiman lisärakentamisen näkymiä Suomessa ja koko Euroopassa. Epävarmuustekijöiden vaikutusten avulla pyrittiin arvioimaan kunkin vähähiilipolun vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia.</p> <p>Vähähiilitavoitteet näyttävät tulosten valossa olevan toteutettavissa monin erilaisin teknologisten kehityspolkujen kautta. Siirtyminen vähähiiliseen yhteiskuntaan näyttäisi kuitenkin onnistuvan varmimmin ilman takaiskuja ja merkittäviä taloudellisia vaikutuksia, mikäli Suomessa energiajärjestelmän tuotantorakenne pidetään riittävän monipuolisena ja panostetaan puhtaan energiateknologian kehittämiseen ja sen tarjoamien mahdollisuuksien hyödyntämiseen. Tulosten mukaan tämä merkitsee esimerkiksi CCS-teknologian soveltamista Suomessa osana vähähiiliteknikoiden valikoimaa sikäli kuin teknologia kaupallistuu. Bioenergia pysyy merkittävimpänä uusiutuvana energialähteenä kaikissa skenaarioissa. Hyvin voimakas tukeutuminen vaihtelevan tuuli- ja aurinkoenergian käytön lisäämiseen edellyttää tulosten valossa erittäin nopeaa teknistä kehitystä ja energian varastoinnin läpimurtoa sekä sisältää merkittäviä teknisiä ja taloudellisia epävarmuuksia.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7439-1 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (verkkojulkaisu)
Julkaisu-aika	Marraskuu 2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	91 s.
Projektin nimi	Low Carbon Finland -platform
Toimeksiantajat	Tekes
Avainsanat	energy systems, models, scenarios, low carbon, climate policy
Julkaisija	VTT PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111

Low Carbon Finland 2050 -platform

Energiajärjestelmien kehityspolut kohti vähähiilistä yhteiskuntaa

ISBN 978-951-38-7439-1 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-122X (verkkójulkaisu)