



Aira Hast, Tommi Ekholm & Ilkka Savolainen

Suomen kansallisten päästö- vähennystoimien epävarmuuksien ja riskien arviointi

ISBN 978-951-38-7512-1 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2011

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374



Tekijä(t) Aira Hast, Tommi Ekholm, Ilkka Savolainen		
Nimeke Suomen kansallisten päästövähennystoimien epävarmuuksien ja riskien arviointi		
Tiivistelmä Suomen tavoitteena on EU:n taakanjakopäätöksen (406/2009/EY) mukaisesti vähentää kansallisia kasvi-huonekaasupäästöjä 16 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi on toteutettava päästövähennystoimia ja työssä tarkastellaan, miten tavoite voidaan saavuttaa mahdollisimman pienin kustannuksin. Päästövähennyskeinoilla saavutettavien päästövähennysten määrään ja niiden kustannuksiin liittyy epävarmuutta, minkä vuoksi toteutettavista päästövähennyskeinoista koostuvalla portfoliolla on riski ylittää asetettu tavoite tai ennalta arvioidut kustannukset. Työssä muodostettiin stokastinen optimointimalli, jonka avulla etsittiin kokonaiskustannukset minimoivia, itsenäisistä päästövähennyskeinoista ja niiden aloitusajankohdista koostuvia portfolioita eri päästövähennystasooilla. Portfoliolla saavutettaviin päästövähennyksiin ja kustannuksiin liittyviä epävarmuuksia tutkittiin tilanteissa, joissa päästövähennykset tulee tehdä joko kansallisoin vähennystoimin tai voidaan lisäksi käydä muiden jäsenmaiden kanssa kauppaa päästökiintiöillä. Tuloksista havaittiin, että kokonaiskustannukset olivat noin 10 % pienempiä, mikäli ei-PKS-päästökauppaa voitiin käydä, mutta kustannuksiin liittyvät riskit olivat huomattavasti suuremmat. Lisäksi työssä tutkittiin, millaiset keinot sisältyvät tehokkaihin portfolioihin ja milloin ne on optimaalista toteuttaa. Tuloksista erottuivat keinot, jotka toteutuivat lähes aina ja keinot, joita tehokkaissa portfolioissa toteutetaan erittäin harvoin. Tämä johtuu siitä, että kokonaiskustannusten minimoinnin vuoksi valitaan toteutettavaksi keinoja, joiden marginaaliset vähennyskustannukset ovat mahdollisimman pieniä. Jos ei-PKS-päästökauppaa ei voida käydä, nousevat marginaaliset vähennyskustannukset päästövähennysten määrän funktiona. Toisaalta jos ei-PKS-päästökauppaa voidaan käydä, voidaan estää marginaalisten vähennyskustannusten kasvu siten, ettei se ylitä päästökiintiön hintaa. Tällöin päästökiintiöllä käytävä kauppa muuttaa toteutettavaksi valittujen keinojen joukkoa. Lisäksi toimien aloitusajankohta muuttuu, koska mallissa kustannusten minimointi tehdään niiden nykyarvon perusteella. Eri tilanteita vastaaville optimiportfolioille tehtiin herkkyyksianalyysi tutkimalla erikseen kustannuksia ja saavutettavia päästövähennyksiä. Molemmilla tilanteissa portfoliolla saavutettavien päästövähennysten epävarmuuteen vaikuttivat eniten samat tekijät, mutta kustannuksiin vaikuttavat tekijät olivat erilaiset eri tilanteissa.		
ISBN 978-951-38-7512-1 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 72176
Julkaisu-aika Huhtikuu 2011	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 44 s. + liitt. 3 s.
Projektin nimi Suomen kansallisen kiintiön päästötavoitteet ja metsänielut – valmistautuminen EU:n ilmasto- ja energiapaketin sekä kansainvälisen ilmasto-politiikan edelleenkehittämiseen	Toimeksiantaja(t) Ympäristöministeriö	
Avainsanat Climate change mitigation, non-emission trading sector, stochastic optimization	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374	



Series title, number and
report code of publication

VTT Working Papers 165
VTT-WORK-165

Author(s) Aira Hast, Tommi Ekholm, Ilkka Savolainen		
Title Assessment of uncertainties and risks of national greenhouse gas abatement actions in Finland		
Abstract <p>According to the Decision (406/2009/EC) of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 Finland should reduce greenhouse gas (GHG) emissions in non-trading sectors (non-ETS) at least 16 % below 2005 levels by 2020. In order to meet this target Finland has to implement GHG abatement activities. A situation where mitigation costs should be as low as possible is studied in this report. To minimize the costs, mitigation activities with the best cost-efficiency should be chosen when forming optimal abatement portfolios. However, the amount of GHG reductions and costs are uncertain with every abatement activity and therefore portfolios involve risks to reduce emissions less than predicted or cause higher costs than estimated beforehand.</p> <p>The objective of this study is to build portfolios which fulfil the reduction target. Each portfolio consists of activities that are chosen to be implemented in the examined timeline 2010–2020 and also the year they will be implemented. In this study abatement activities are chosen among 17 independent mitigation actions. To form an optimal portfolio for different levels of GHG reductions, a stochastic optimization model is built. To meet the reduction target the Member States of EU can trade their non-ETS allocations. Two cases are compared to each other in this study. In the first case the Member States have to meet the target by national mitigation actions, and in the second case the Member States can also trade non-ETS allocations in 2020. Comparison is made by examining how the costs, reductions gained by national mitigation actions and uncertainties related to them differ from each other in these two cases. The results prove that overall costs are approximately 10 % lower when the Member States can trade allocations. On the other hand, when trading allocations is possible, the risk to exceed the expected costs increases. The results show also that some abatement actions are chosen nearly always while other actions are chosen extremely seldom. This is because minimization of overall costs causes abatement actions with lowest marginal abatement costs to be chosen. The possibility of trading allocations changes the set of implemented actions and postpones their optimal timings because optimization is done by minimizing the present value of overall costs. Sensitivity analysis is performed for cost minimizing portfolios in different cases so that overall costs and gained reductions are studied separately. Uncertainty in gained reductions is caused by the same sources in both cases. Yet, the variables causing uncertainty in costs are somewhat different in different cases.</p>		
ISBN 978-951-38-7512-1 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459–7683 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 72176
Date April 2011	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 44 p. + app. 3 p.
Name of project Emission targets in the EU and forest sinks - preparation for future EU and international climate policy	Commissioned by Ministry of the Environment	
Keywords Climate change mitigation, non-emission trading sector, stochastic optimization	Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374	

Alkusanat

Tässä työssä tarkastellaan päästökauppaan kuulumattomien sektoreiden päästövähennystoimiin ja niiden kustannuksiin liittyviä epävarmuuksia ja riskejä Suomen kannalta. Lisäksi tutkitaan, miten jäsenmaiden välinen päästökaupalla käytävä kauppa vaikuttaa työssä saatuihin tuloksiin.

Tutkimus toteutettiin toukokuussa 2010–helmikuussa 2011 osana ympäristöministeriön VTT:ltä tilaamaa tutkimushanketta ”Suomen kansallisen kiintiön päästötavoitteet ja metsänielut – valmistautuminen EU:n ilmasto- ja energiapaketin sekä kansainvälisen ilmastopolitiikan kehittämiseen”. Työn toteutti tutkimusjärjestelmä Aira Hast tutkija Tommi Ekholm ja tutkimusprofessori Ilkka Savolaisen ohjauksessa. Ympäristöministeriöstä työtä ohjasivat neuvotteleva virkamies Magnus Cederlöf, ympäristöneuvos Jaakko Ojala ja neuvotteleva virkamies Harri Laurikka.

Sisällysluettelo

Alkusanat	5
1. Johdanto	7
2. Menetelmät	9
3. Päästölähteet ja -vähennyskeinot	13
3.1 Liikenne	13
3.2 Lämmitys	15
3.3 Jätehuolto	16
3.4 Maatalous	17
3.5 Työkoneet	18
3.6 F-kaasut	19
3.7 Energian hintaennusteet	19
4. Tulokset.....	21
4.1 Optimaaliset portfoliot ominaisuuksineen, kun huomioituna vain ajalliset joustot.....	22
4.2 Optimaaliset portfoliot ominaisuuksineen ei-PKS-päästökaupan tilanteessa	30
4.3 Jäsenmaiden välisten joustojen vaikutukset	32
4.4 Herkkyystarkastelu.....	35
5. Yhteenveto	38
Lähdeluettelo	43
Liitteet	

Liite A: Mallin muuttujien jakaumat

1. Johdanto

Euroopan parlamentti hyväksyi 17.12.2008 EU:n energia- ja ilmastopakettin, jonka mukaan Euroopan Unioni on sitoutunut vähentämään päästöjään vuoteen 2020 mennessä 20 % vuoden 1990 tasosta (EU:n energia- ja ilmastopaketti). Suomi on sitoutunut vähentämään päästökaupan ulkopuolisilla sektoreilla päästöjään 16 % vuoden 2005 päästöistä vuoteen 2020 mennessä (Päätös 406/2009/EY). Päästöjen tulee vähentyä lineaarisesti kohti vuoden 2020 tavoitetta, jolloin vuosille 2013–2020 muodostuu vuotuinen tavoitteellinen päästötaso (EU:n energia- ja ilmastopaketti). Tässä työssä tarkastellaan Suomen päästökaupan kuulumattomien sektoreiden (ei-PK-sektorit) päästövähennyskeinoja sekä niiden kustannuksia ja epävarmuuksia, kun päästöjä vähennetään Suomen EU:n tavoitteen mukaisesti.

Päästötavoitteen saavuttamiseksi voidaan kansallisten päästövähennyskeinojen toteuttamisen lisäksi käyttää myös joustomekanismeja. Jäsenmaa voi siirtää omaan käyttöönsä käyttämättä jääneet päästöoikeudet tulevia vuosia varten tai tasapainottaa päästöjen vuosivaihtelua siirtämällä päästöjä seuraavalle vuodelle määrän, joka vastaa viittä prosenttia kyseisen vuoden päästokiintiöstä. Ajallisten joustojen lisäksi jäsenmaa voi hyödyntää päästötavoitteen saavuttamisessa sekä Kioton sopimuksen alaisia CER- ja ERU-päästövähennysyksiköitä että jäsenmaiden välistä päästökauppaa ei-PK-sektorin päästokiintiöillä (Päätös 406/2009/EC). Jälkimmäisessä jäsenmaa, jolla toteutuvat päästöt jäävät sille määrätyn päästokiintiön alle, voi myydä ylimääräisiä päästöoikeuksia muille jäsenmaille, jotka voivat siten korvata päästokiintiönsä ylityksen. CER- ja ERU-yksiköiden käyttö on rajattu vuosittain enintään kolmen prosentin tasolle jäsenmaan vuoden 2005 päästöistä. Tässä työssä on lähtökohtaisesti tarkasteltu ei-PK-sektorin kiintiöiden päästökauppaa jäsenmaiden välillä.

Työssä tarkasteltavia päästökaupan ulkopuolisia sektoreita, joilla tehtäviä päästövähennyksiä työssä tutkitaan, ovat liikenne, maatalous, lämmitys, työkoneet, jätehuolto sekä F-kaasut. Päästöjen rajoittaminen annetulle tasolle tulisi tehdä minimikustannuksin, jotta yhteiskunnan resursseja voitaisiin hyödyntää mahdollisimman kustannustehokkaasti. Toisaalta mikäli päästövähennyksille sallittavaa kustannustasoa voidaan nostaa, on tällöin mahdollista saavuttaa annettua tavoitetta suurempia päästövähennyksiä, kun toteutetaan kustannustehokkaita vähennyskeinoja. Asetettuja tavoitteita ei voida saavuttaa toteuttamalla yksittäisiä vähennyskeinoja ja työssä pyritään etsimään useista

vähennyskeinoista koostuvia kustannustehokkaita portfolioita, joilla asetetut tavoitteet saavutetaan mahdollisimman pienin kustannuksin. Keinon kustannustehokkuutta voidaan mitata selvittämällä, kuinka suuret kustannukset aiheutuvat vähennettyä hiilidioksidiekvivalenttia kohden päästövähennyskeinoon vaikutusaikana. Vähennyskeinoilla saavutettavat päästövähennykset ja niiden kustannukset ovat kuitenkin epävarmoja, minkä vuoksi päästövähennyskeinoista koostuvalla portfoliolla on riski olla saavuttamatta ennakoitua päästövähennemää tai ylittää arvioidut kustannukset. Työssä tutkitaan, kuinka suurina nämä riskit ovat eri päästövähennystasojen vastaavissa portfolioissa ja miten päästökiintiöllä käytävä kauppa vaikuttaa riskien suuruuteen.

2. Menetelmät

Työssä muodostettiin stokastinen optimointimalli, jonka avulla voidaan tutkia vuotuisen päästöjen kehitystä ja vähennysmahdollisuuksia aikavälillä 2010–2020. Mallilla pyritään löytämään keinoportfolio, joka minimoi kustannusten nykyarvon odotusarvon. Mallissa päätösmuuttujina käytetään toimien aloitusvuosia ja optimaalinen portfolio koostuu tällöin aikavälillä 2010–2020 aloitettavista vähennystoimista ja niiden aloitusajankohdista. Kustannusten nykyarvon laskennassa korkokantana käytetään viittä prosenttia. Vuosina 2013–2020 voidaan hyödyntää ajallisia joustomekanismeja, jolloin jäsenmaat voivat tasapainottaa päästöjen vuosivaihtelua siirtämällä päästöjä seuraavalle vuodelle määrän, joka vastaa viittä prosenttia kyseisen vuoden päästökaupasta. Päästövähennyskeinojen vaikutuksia muille kuin ei-PK-sektorille ei ole huomioitu ja siten vaikutukset esimerkiksi LULUCF:lle on jätetty mallissa huomioimatta.

Mallissa tarkastellaan 17 itsenäisen päästövähennyskeinojen toteuttamista tai toteuttamatta jättämistä kyseisellä aikavälillä. Tarkasteltuja vähennyskeinoja ovat esimerkiksi öljykattiloiden korvaaminen käyttöään lopussa, metsätähdedieselin käytön lisääminen liikenteen polttoaineena sekä kaatopaikkajätteestä muodostuvan metaanin talteenoton tai hapetuksen määrän lisääminen. Mallissa epävarmuutta liittyy perusrapäästöihin, päästövähennyskeinoilla saavutettaviin päästövähennyksiin ja niiden kustannuksiin. Epävarmuus on kuvattu mallissa todennäköisyysjakaumien avulla siten, että jakauman leveys kuvaa epävarmuuden suuruutta. Epävarmuudet aiheutuvat esimerkiksi energian markkinahintojen sekä päästöjen muodostumiseen vaikuttavien muuttujien, kuten liikennesuoritteiden ja päästökertoimien, ennusteiden epävarmuudesta.

Taustamuuttujien epävarmuuksien vaikutus lopputuloksiin on määritetty Monte Carlo -menetelmän avulla. Menetelmä valitsee jokaisesta mallin satunnaismuuttujan jakaumasta satunnaisluvun ja laskee näiden satunnaislukujen perusteella lopputulokset. Laskenta toistetaan kymmeniä tuhansia kertoja valiten aina uudet satunnaisluvut, jolloin saadaan eri lähtötietoja hyödyntävien lopputulosten joukko. Mallissa satunnaismuuttujat oletetaan toisistaan riippumattomiksi raakaöljyn ja dieselin hintaa lukuun ottamatta. Menetelmällä voidaan selvittää siten satunnaislukuja ja useita simulaatioita käyttäen,

2. Menetelmät

millaisia jakaumia toteutuvat päästövähennykset ja kokonaiskustannusten nykyarvo noudattavat.

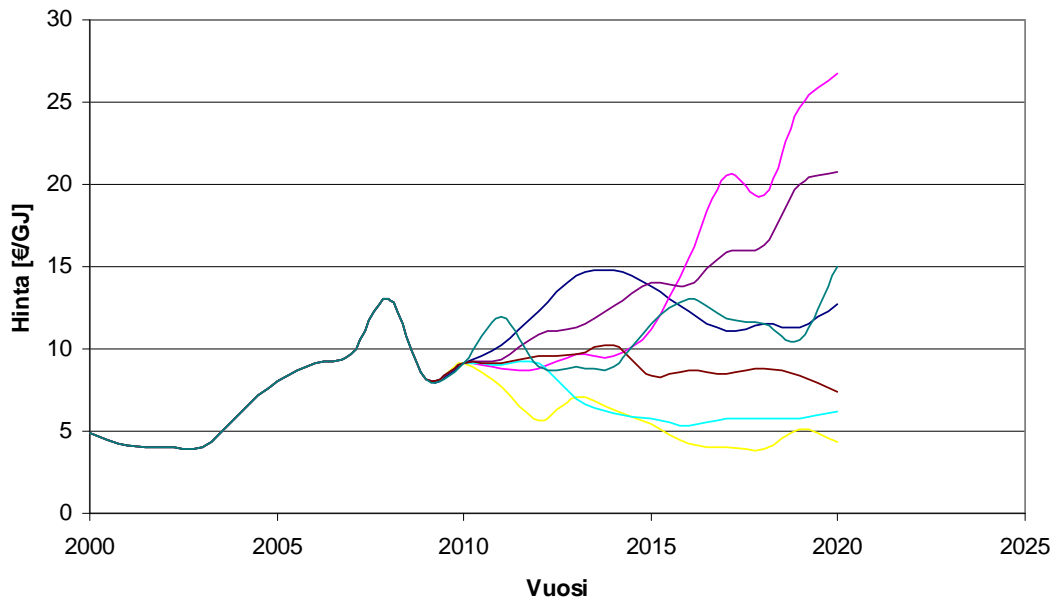
Työssä on tarkasteltu lisäksi erikseen tilannetta, jossa jäsenmaat voivat käydä kauppaa ei-PK-sektorin päästökauppiin¹. Taulukossa 1 on esitetty arvioita, joiden perusteella mallissa on muodostettu jakauma, joka kuvaa hintaa jolla Suomi voisi ostaa tai myydä päästökauppiin. Hinta vuonna 2020 noudattaa tällöin symmetristä normaalijakaumaa keskiarvolla 54 €/t CO₂ ja keskihajonnalla 30 €/t CO₂.

Taulukko 1. Päästökaupin hintaennusteet vuodelle 2020.

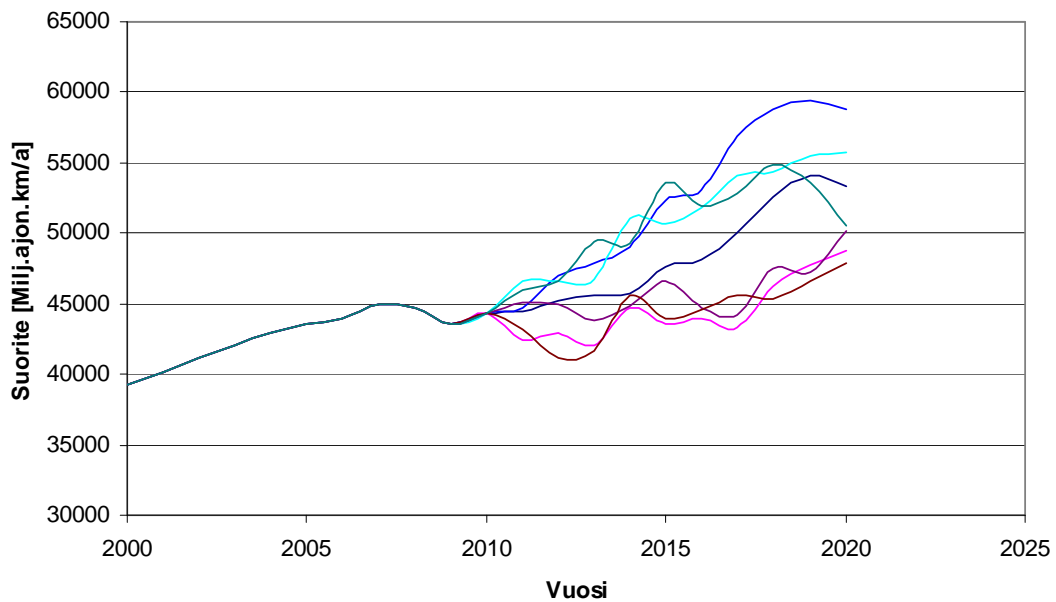
Päästökaupin hinta-arvio [€/t CO ₂]	Lähde
105	(Böhringer ym., 2009)
63	(Bernard & Vielle, 2009)
44	(Ekholm, 2010a)
4	(European Commission, 2010)

Mallissa useimpien muuttujien epävarmuutta on kuvattu satunnaiskulun avulla muodostetun levenevän todennäköisyysjakauman avulla. Satunnaiskululla tarkoitetaan stokastista tulevaisuusprojektiota, jolle tarkasteltavan arvon erotus kahden vuoden välillä on ennaltamäärätyn todennäköisyysjakauman mukainen. Tällöin muuttujan arvo kehittyy satunnaisesti ajan myötä. Esimerkkinä tästä kuvassa 1 on esitetty seitsemän raakaöljyn mahdollista kehityskulkua esittävää aikasarjaa, ja kuvassa 2 on esitetty seitsemän erilaista, perusuran mukaista henkilöautoilla tehtävän ajosuorituksen kehittymistä ajan funktiona vuosina 2000–2020.

¹ Ei-PK-sektorin päästötavoitteisiin voidaan käyttää myös Kioton sopimuksen määrittelemiä CER- ja ERU-päästövähennysyksiköitä rajallisesti, vuosittain 3 % vuoden 2005 päästötasosta, ja lisäksi vähiten kehittyvistä maista ylimääräisen 1 % verran VER-yksiköitä (Päätös 406/2009/EC). Vaikka työssä tarkastellaan lähtökohtaisesti jäsenmaiden välistä päästökauppaa ei-PK-sektorin kiintiöillä, voidaan tämän päästökaupan tulkita käsittävän myös CER- ja ERU-kiintiöiden oston. Tällöin on kuitenkin hyvä huomioida, että nykyinen CER- ja ERU-kiintiöiden markkinahinta on merkittävästi alempi kuin mallissa käytetyn hinnan keskiarvon (54 €/t CO₂ vuonna 2020) nykyarvo 5 % diskonttorolla.



Kuva 1. Esimerkkejä raakaöljyn hinnan mahdollisista kehityskuluista mallissa.



Kuva 2. Esimerkkejä henkilöautojen ajosuoritteiden mahdollisista kehityskuluista mallissa.

Kuten kuvista 1 ja 2 nähdään, historiallinen kehitys (ennen vuotta 2010) tunnetaan, mutta tästä eteenpäin tehtyihin ennusteisiin liittyy sitä suurempi vaihteluväli mitä kauempana tulevaisuudessa olevia arvoja tarkastellaan.

Mallilla muodostettujen portfolioiden kustannuksiin ja saavutettuihin päästövähennyksiin liittyy epävarmuuksia, joita työssä tutkitaan. Tällöin löydettävään portfolioon

2. Menetelmät

liittyville riskeille voidaan määrätä sallitut ylärajat asettamalla rajoitusehdoja päästöjen tai kustannusten vaihtelulle, ja tutkia, millaisia vaikutuksia rajoituksilla on optimaalisen portfolion ominaisuuksiin. Ilman riskeihin liittyviä rajoitusehdoja optimointi suoritetaan kuitenkin päästöjen ja kustannusten odotusarvojen perusteella ja tällöin voidaan odotusarvoiltaan optimaalisista portfolioista muodostaa Pareto-tehokkaiden portfolioiden joukko. Pareto-käyrän pisteet ovat sellaisia portfolioita, joissa syntyvien päästöjen odotusarvoa ei voida pienentää kasvattamatta kustannusten odotusarvoa.

Mallilla saatavien tulosten perusteella tutkitaan, kuinka usein kukin keino esiintyy Pareto-tehokkaissa portfolioissa. Lisäksi Pareto-käyrän avulla arvioidaan, millaiset marginaaliset kustannukset kullekin päästötasolle liittyvät. Marginaalikustannusten ja päästökäytön hinnan erotus kertoo, milloin päästövähennyksiä ei enää välttämättä kannata tehdä kansallisilla vähennystoimilla vaan ostamalla päästöoikeuksia muilta jäsenmailta. Lopuksi työssä tehdään saaduille tuloksille herkkyyshanalyysi, jonka perusteella voidaan tunnistaa optimaalisten portfolioiden kustannusten ja päästömäärien epävarmuuksien merkittävimmät aiheuttajat.

3. Päästölähteet ja -vähennyskeinot

Mallissa päästövähennyskeinot on kuvattu suoritettavaksi täydessä potentiaalisuudessaan, minkä vuoksi eri portfolioilla saavutettavat päästövähennykset jakautuvat diskreetisti. Keinot on pyritty rajaamaan siten, etteivät ne vaikuta päällekkäisesti saman päästölähteen päästöihin, tai mahdollisten päällekkäisyyksien vaikutukset on kyetty huomioimaan mallissa. Tällöin keinot voidaan toteuttaa tai jättää toteuttamatta muista keinoista riippumatta. Tämän lisäksi keinot oletetaan peruuttamattomiksi. Vähennyskeinon, joka vaatii aloitusvuonna alkuinvestointeja, kustannukset lasketaan sille vuodelle, jona toimi aloitetaan, vaikka keinon avulla voidaan vähentää päästöjä myös tulevana vuosina. Tällaisten keinojen päästövähennykset jaetaan kuitenkin useammalle vuodelle, jotta päästömääriä hyödyntävissä laskuissa on käytössä oikeat vuotuiset päästömäärät.

3.1 Liikenne

Liikennesektorin päästöt aiheutuvat fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Tässä työssä liikenteen päästöt jaetaan henkilöautoliikenteeseen ja raskaaseen liikenteeseen, joka muodostuu paketti-, kuorma- ja linja-autojen päästöistä. Henkilöautoliikenteen osalta tarkasteltavia päästövähennyskeinoja ovat autojen polttoainetehokkuuden parantaminen ja biopolttoaineiden osuuden lisääminen käytetystä polttoaineesta. Lisäksi tarkastellaan henkilöautoilla tehtävän suoritteiden ja siten päästöjen vähentämistä kevyen liikenteen ja joukkoliikenteen käytön edistämällä. Raskaan liikenteen päästövähennyskeinoina tarkastellaan fossiilisten polttoaineiden korvaamista maakaasun ja biopolttoaineiden käytön lisäämisellä.

Tieliikenteen perusrapäästöt lasketaan LIISA-laskentajärjestelmässä esitettyjen suoritteiden perusuran avulla. Perusuraan on kuitenkin lisätty satunnaiskulun avulla levenevä epävarmuutta kuvaava jakauma. Ensirekisteröitävien henkilöautojen päästökerroimen perusura on muodostettu siten, että päästökerroin kehittyy lineaarisesti vuosien 2009 ja 2020 välillä. Vuoden 2020 ensirekisteröityjen autojen päästökerroin on laskettu LIISA-laskentajärjestelmässä ilmoitettujen henkilöautojen kokonaispäästöjen ja henkilöautoilla tehdyille suoritteelle muodostetun perusuran mukaan, kun on huomioitu las-

3. Päästölähteet ja -vähennyskeinot

kentäjärjestelmässä ilmoitettu eri-ikäisten autojen osuus tehdystä suoritteesta (Mäkelä ym. 2009). Vuoden 2009 ensirekisteröityjen autojen päästökertoimena on käytetty arvoa 157,3 CO₂ g/km (AKE). Raskaan liikenteen osalta päästöjen arvioinnissa on käytetty LIISA-laskentajärjestelmässä ilmoitettuja päästökertoimia (Mäkelä ym., 2009). Sekä henkilöautojen että raskaan liikenteen päästökertoimien perusurille on muodostettu levenevä jakauma satunnaiskulun avulla. Mallissa on oletettu lisäksi, että eri-ikäisillä autoilla tehtävien suoritteiden osuudet pysyvät koko tarkasteltavalla aikavälillä LIISA-laskentajärjestelmän tuloksia vastaavina. Henkilöautojen keskimääräiseksi käyttöikäksi on oletettu 20 vuotta. (Mäkelä ym., 2009)

EU:n tavoite vuonna 2020 rekisteröitävien uusien henkilöautojen polttoainetehokkuudesta on 95 g CO₂/km. Polttoainetehokkuuden paraneminen on mallissa kuvattu siten, että hybridautojen osuus ensirekisteröitävistä autoista kasvaa niin, että EU:n tavoite täyttyy jokaisena vuotena. Tällöin tavallisten ensirekisteröitävien autojen päästökerroin kehittyy perusuran mukaisesti ja hybridautojen päästökertoimeksi kaikille vuosille on arvioitu 89,3 CO₂ g/km. Keinon kustannukset on mallissa arvioitu vertaamalla tavallisen bensiinimoottorilla toimivan auton ja hybridauton ostosta ja käytöstä aiheutuvia kustannuksia. Tavallisen auton hinnaksi on arvioitu 23 500 € ja hybridauton hinnaksi 27 000 €, kun bensiini- ja hybridautojen vertailussa on käytetty Toyota Auriksen hintoja (Toyota). Bensiiniauton kulutukseksi arvioidaan 0,066 l/km ja hybridauton kulutukseksi 0,038 l/km. Auton vuotuinen keskiarvoinen käyttö on laskettu LIISA-laskentajärjestelmän tietojen perusteella. Tällöin keinon päästövähennyskustannus voidaan laskea ostohinnan ja polttoainekustannusten aiheuttamien investointien nykyarvon erotuksena, kun huomioidaan autojen aiheuttamat erilaiset päästöt.

EU:n tavoitteen mukaan vuonna 2020 henkilöautoilla tehtävissä liikennesuoritteissa biopolttoaineen osuus on 10 %. Työssä tehdyssä tarkastelussa oletettiin, ettei biopolttoaineiden käytöstä aiheudu päästöjä ei-PK-sektorille ja mikäli toimi aloitetaan, vähentyvät päästöt suhteellisesti yhtä paljon niin henkilöliikenteessä kuin raskaassakin liikenteessä. Keinon päästövähennys on arvioitu siten, että toimen aloittamisvuodesta alkaen päästöt vähenevät lineaarisesti niin, että vuonna 2020 päästöt ovat biopolttoaineen lisäämisen vuoksi 10 % perusurapäästöjä pienemmät. Keinon kustannukset on arvioitu korvattavan fossiilisen polttoaineen, joka muodostetussa mallissa vastaa dieseliä, ja korvaavan polttoaineen, jona on työssä tarkasteltu metsätähdedieseliä, hintojen erotuksesta.

Biopolttoaineen käytön lisäämisen lisäksi raskaassa liikenteessä voidaan päästöjä vähentää myös lisäämällä maakaasun käyttöä kuorma- ja linja-autojen polttoaineena. Mallissa on arvioitu, että maakaasun käytön edistämällä päästöjä voidaan vähentää 85 prosenttiin perusuran mukaisesta päästömäärästä, kun laskennassa on huomioitu diesel- ja maakaasumoottoreiden erilaiset hyötysuhteet. Keinon kustannukset muodostuvat maakaasun ja dieselin hinnan erotuksesta.

Kulutuksen ohjauksena tarkastellaan joukkoliikenteen ja kevyen liikenteen lisäämismahdollisuuksia, joilla voitaisiin vähentää henkilöautoilla tehtävää liikennesuoritetta korvaamalla fossiilisia polttoaineita hyödyntävä kulkutapa päästöttömällä tai vähäpäästöisemmällä vaihtoehdolla. Joukkoliikenteen ja kevyen liikenteen edistämistä käsitellään mallissa yhtenä vähennyskeinona, jolla saavutettava päästövähennys on arvioitu vuotuisena vähennysprosenttina, joka mahdollisten muiden keinojen vaikutusten huomioon jälkeen vähennetään toteutuvista päästöistä, kun keino on toteutettu. Liikenne- ja viestintäministeriön ilmastopoliittisessa ohjelmassa arvioidaan, että joukkoliikenteen edistämällä päästöjä voidaan vähentää vuosittain 0,15 Mt CO₂-ekv ja kevyen liikenteen edistämällä 0,12 Mt CO₂-ekv (LVM 2009). Mallissa käytetty keinojen vähennysprosentti on arvioitu laskemalla, kuinka suuren osuuden ilmastopoliittisessa ohjelmassa arvioidut vuotuiset vähenevät päästöt muodostavat ilmastopoliittisessä ohjelmassa käytetystä perusrasta kunakin vuotena. Keinojen kustannukset on arvioitu ilmastopoliittisen ohjelman perusteella siten, että kustannukset ovat 15 miljoonaa euroa vuonna 2010, 20 miljoonaa euroa vuonna 2011, 32 miljoonaa euroa vuosina 2012–2015 ja 50 miljoonaa euroa vuonna 2020. (LVM, 2009). Vuosina 2015–2020 kustannusten on arvioitu kehittyvän lineaarisesti.

3.2 Lämmitys

Työssä tarkastellaan lämmitykseen liittyviä suoria päästökaupan ulkopuolisten sektoreiden päästöjä ja erityisesti sitä, miten kuluttajien tekemää lämmitysmuotojen valintaa voidaan ohjata vähemmän päästöjä tuottavaan suuntaan. Lämmityksen päästöt aiheutuvat tällöin fossiilisten polttoaineiden (polttoöljy) käytöstä ja työssä tärkeimpinä vähennyskeinoina tarkastellaan öljykattiloiden korvaamista vähemmän päästöjä tuottavilla vaihtoehdoilla käyttöikänsä lopussa tai ennenaikaisesti. Vaihtoehtoisina lämmitysmuotoina mallissa tarkastellaan maalämpöä, vesi- ja ilmalämpöä, suoraa sähkölämmitystä sekä fossiilisen öljyn korvaamista bioöljyllä. Nämä vaihtoehtoiset lämmitysmuodot arvioidaan mallissa päästöttömiksi päästökaupan ulkopuoliselle sektorille, vaikka ne voivatkin lisätä päästöjä päästökauppa- ja LULUCF-sektorilla.

Mallissa öljykattiloiden lukumääräksi oletetaan vuonna 2010 noin 230 000 (Öljyalan keskusliitto) ja öljylämmityksen kokonaispäästöiksi 1,53 Mt CO₂-ekv. Tällöin kattilan keskimääräiseksi vuotuiseksi päästökseen saadaan 6,67 t CO₂-ekv. Öljykattiloiden päästöjä kuvaava perusura on tehty satunnaiskulun avulla leveneväksi siten, että vuoden 2020 perusrapäästöt noudattavat normaalijakaumaa hajonnalla 20 %. Mallissa öljykattiloiden keskimääräiseksi käyttöikäksi oletetaan 20 vuotta ja nykyisen laitekannan ikäjakama tasaiseksi. Lisäksi oletetaan, ettei lämmitystarve merkittävästi muutu eri vuosina, joten kattiloiden vuotuiset päästöt pysyvät vakiona.

Mallissa tarkastellaan jokaisena laskentavuotena käytössä olevien öljykattiloiden määrää ja ikäjakamaa. Jokaisen vuoden lopussa vanhenee siis ikäjakaman perusteella

3. Päästölähteet ja -vähennyskeinot

laskettu määrä öljykattiloita. Käyttöään lopuksi öljykattila voidaan poistaa käytöstä ja korvata lämmitystarve vaihtoehtoisella lämmitysmuodolla. Vaihtoehtoisina lämmitysmuotoina mallissa tarkastellaan maalämpöä, vesi- ja ilmalämpöä, suoraa sähkölämmitystä sekä fossiilisen öljyn korvaamista bioöljyllä. Toisaalta öljykattila voidaan myös uusia, jolloin vanheneva kanta korvataan kokonaisuudessaan uusilla öljykattiloilla. Öljykattiloiden uusiminen ja vaihtoehtoisten lämmitysmuotojen käyttö aiheuttaa alkuinvestointeja ja käyttökustannuksia, joista mallissa käytetyt arviot on esitetty taulukossa 2. Mallissa tehdään eri lämmitysmuotojen kustannusoptimointi kuluttajan näkökulmasta ja optimoinnin tuloksen perusteella päätetään, mikä lämmitysmuoto valitaan korvaamaan koko vanhenevaa kattilakantaa vastaava lämmitystarve. Mikäli vanhenevat öljykattilat päätetään uusia, lisätään tämä määrä kattilakantaan uusien öljykattiloiden ikäluokkaan.

Taulukko 2. Lämmitysmuotojen kustannukset ja ominaisuudet.

Lämmitysmuoto	Investointikustannus [€/laite]	Käyttöikä [v]	Kulutus/laite [GJ/v]	Hyötysuhde
Öljy	6000	20	73	1
Bioöljy	6000	20	73	1
Sähkö	2000	20	73	1
Ilma-vesilämpö	5000	20	73	2
Maalämpö	9000	20	73	3

Käyttöään lopussa tehtävän korvaamisen sijaan voidaan korvata myös koko kattilakanta ennaikaisesti muilla lämmitysmuodoilla. Tällöin aikaistetaan vaihtoehtoisiin lämmitysmuotoihin liittyviä investointeja. Koska kattilakanta arvioidaan aluksi tasajakautuneeksi, korvataan ennaikaisesti keskimäärin 10 vuotta vanhoja kattiloita. Mallissa ennaikaisen korvaamisen aiheuttamat kustannukset suoritetaan mallissa toimen aloitusvuonna. Vältetyt päästöt jakautuvat mallissa kuitenkin siten, että jokaisena vuotena vältetään päästöt, jotka korvattu kapasiteetti olisi käytössä aiheuttanut.

3.3 Jätehuolto

Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastategiassa esitetty arvio päästökauppaan kuulumattoman jätehuollon vuoden 2005 päästöistä on 2,46 Mt CO₂-ekv, joista 90 % arvioidaan aiheutuvan kaatopaikoilta vapautuvasta metaanista (TEM, 2008; Tilastokeskus, 2010). Työssä tarkastellaan jätehuollon päästövähennyskeinoina orgaanisen aineksen kaatopaikkasijoituksen täyskieltoa, kaatopaikkojen metaanin talteenoton kehittämistä ja metaanin hapetusta. Tuotetun jätemäärän pienentäminen riippuu kulutustottumusten lisäksi myös materiaalitehokkuuden ja tekniikan kehittymisestä. Kaatopaikalle päätyvän biohajoavan jätteen määrää voidaan pienentää jätteiden lajittelun ja kompostoinnin avulla. (Huhtinen ym., 2007)

Hapettamista käytetään yleensä pienemmillä kaatopaikoilla, kun suuremmille kaatopaikoille soveltuu käytettäväksi kaatopaikkakaasun talteenotto. Tuhkanen on raportissaan Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä arvioinut, että pienten kaatopaikkojen pintakerroksessa tapahtuvan metaanin hapetuksen päästövähennyskustannus on noin 15–20 €/t CO₂-ekv ja keinolla voidaan vähentää noin 50 prosenttia syntyvästä metaanista. Kaatopaikkakaasun talteenoton päästövähennyskustannukseksi Tuhkanen on arvioinut noin 2,5–5 €/t CO₂-ekv ja saanto syntyvästä metaanista on noin 70 prosenttia. (Tuhkanen ym., 2002) Metaanin hapetukselle ja talteenoton vähennyspotentiaaleille on muodostettu arviot Tuhkasen ilmoittamien lukujen sekä Tilastokeskuksen kasvihuonekaasuinventaarissa kuvattujen laskemien perusteella (Tilastokeskus, 2010). Metaanin hapetuksen investointikustannusten arvioidaan mallissa noudattavan tasajakaumaa välillä 158–237 M€ Metaanin talteenoton investointikustannusten arvioidaan jakautuvan tasaisesti välille 35,3–60,2 M€

Mallissa kaatopaikkasijoituksen täyskiellon kustannusten on arvioitu noudattavan tasajakaumaa välillä 0–50 €/t CO₂-ekv (Monni ym., 2006). Keinon vähennyspotentiaalilaskemisessa on hyödynnetty Valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa ilmoitettuja, eri menetelmin käsiteltävien orgaanisten aineiden perusuria (Huhtinen ym. 2007) hyödyntäen Tilastokeskuksen kasvihuonekaasuinventaarissa kuvattuja menetelmiä (Tilastokeskus 2010).

3.4 Maatalous

Maatalouden päästöjä syntyy karjan ruuansulatuksen tuottamasta metaanista, lannan käsittelyn metaanista ja dityppioksidista sekä maaperän dityppioksidista, jotka aiheutuvat muun muassa lannoitteiden käytöstä (Tilastokeskus 2010). Suomen maatalouden päästövähennyskeinojen ja -kustannusten tiedot sisältävät melko suurta epävarmuutta. Työssä kustannustehokkaiksi vähennyskeinoiksi on kuitenkin arvioitu lannan käsittelymenetelmien kehittäminen lannan mädätyksen ja kompostoinnin avulla. Tarkastelu tehdään erikseen karja-, sika- ja siipikarjatilojen osalta, koska tilan tyyppillä on vaikutus päästövähennyspotentiaaliin sekä niitä vastaaviin kustannuksiin. Keinojen vähennyspotentiaalit on mallissa laskettu arvioimalla eri lajien eläinmäärien kehitys vuoteen 2020 asti Tilastokeskuksen laatimien aiempien vuosien eläinmääriä kuvaavien tilastojen perusteella (Tilastokeskus 2010). Erilaisilla tilatyypeillä tehtävän lannan käsittelyn päästövähennysprosentit perusurasta lasketaan arvioimalla eri eläinlajien päästöjen osuutta kaikkien eläinten päästöistä. Työssä arvioidaan, että märehäntäjien tuottamia päästöjä voidaan lannankäsittelyllä vähentää noin 46 prosenttia lannankäsittelyn perusurasta. Sikatiloilla lannankäsittelyn perusurasta saavutettavaksi vähennykseksi arvioidaan noin 33 % ja siipikarjatiloiilla noin 17 %. Kunkin eläinlajin tuottamaa päästöä kuvaava kerroin on laskettu jakamalla Tilastokeskuksen ilmoittamat, vuoden 2008 eri eläinlajien kokonaispäästöt eläinten määrällä. (Tilastokeskus, 2010)

3. Päästölähteet ja -vähennyskeinot

Maatalouden perusurapäästöt jaetaan mallissa märehitjoiden, lannankäsittelyn ja maatalousmaiden päästöiksi. Perusurassa märehitjoiden tuottamat päästöt vuonna 2020 ovat 1,34 Mt CO₂-ekv, lannankäsittelyn 0,78 Mt CO₂-ekv ja maatalousmaiden 3,35 Mt CO₂-ekv. Perusurassa näiden lähteiden epävarmuus muodostetaan satunnaiskulun avulla siten, että vuonna 2020 perusurapäästöt noudattavat normaalijakaumaa keskihajonnalla 10 %. Keinon päästövähennyskustannuksen laskemisessa käytetään Hagströmin ym. esittämiä arvioita tilan keskimääräisestä koosta ja vuosituloksesta. (Hagström ym. 2005) Lannankäsittelyn vähennyskustannukseksi karjatilojen osalta saadaan tällöin 98,5 €/t CO₂-ekv. Vastaavaa laskentaa ja Hagströmin ym. arvioita käyttäen sikatilan lannankäsittelyn vähennyskustannukseksi saadaan 38,9 €/t CO₂-ekv ja siipikarjatiloin vähennyskustannukseksi 1,8 €/t CO₂-ekv. (Hagström ym. 2005)

3.5 Työkoneet

Työkoneiden aiheuttamat päästöt päästökaupan ulkopuoliselle sektorille aiheutuvat fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Mallissa työkoneiden päästöjen perusura noudattaa Työkoneiden päästömallin (TYKO 2006) perusuraa. Tällöin vuoden 2020 perusurapäästöt ovat 2,7 Mt CO₂-ekv. ja mallissa on lisäksi arvioitu, että vuoden 2020 päästöt noudattavat normaalijakaumaa hajonnalla 10 %. Vuodesta 2010 alkaen tasaisesti levenevä epävarmuutta kuvaava jakauma muodostetaan satunnaiskulun avulla. Työkoneiden tärkeimpänä päästövähennyskeinona tarkastellaan biopolttoaineiden käytön lisäämistä. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiassa on esitetty kaksi vaihtoehtoista politiikkatoimea. Ensimmäisen mukaan vuonna 2020 biokomponentin osuus työkoneissa käytettävästä nostetaan 10 prosenttiin. Toinen politiikkatoimi sisältää tavoitteen, jonka mukaan 100 prosenttia työkoneissa käytettävästä dieselistä ja 10 prosenttia bensiinistä olisi vuonna 2020 biopolttoainetta. (YM 2008) Tässä työssä on arvioitu, ettei dieselin täydellinen korvaaminen biopolttoaineilla vuoteen 2020 mennessä ole enää realistista ja tämän vuoksi on tarkasteltu pelkästään ensimmäistä politiikkatoimea. Päästökaupan ulkopuolisella sektorilla biopolttoaineen ajatellaan olevan päästötöntä, joten keinolla voidaan pienentää työkoneiden aiheuttamia vuoden 2020 päästöjä 10 prosenttia.

Mallissa keinon kustannukset lasketaan dieselin ja biopolttoaineen hintojen erotuksesta korvattavalle polttoaineelle. Biopolttoaineen ja dieselin hinnan kehitykselle on laadittu ennuste, jota käsitellään tarkemmin kappaleessa Energian hintaennusteet. Biopolttoaineen tuotantoon ja käyttöön liittyvistä kustannuksista ei ole kuitenkaan vielä riittävästi tietoa markkinahinnan kehityksen tarkkaan ennustamiseen ja keinon kustannukset sisältävätkin huomattavaa epävarmuutta.

3.6 F-kaasut

Työssä F-kaasupäästöjä kuvataan perusuralla, jonka mukaan vuoden 2020 päästöt ovat 0,626 Mt CO₂-ekv. Perusurapäästöjen epävarmuus muodostetaan satunnaiskulun avulla siten, että vuonna 2020 perusurapäästöt noudattavat normaalijakaumaa keskihajonnalla 20 %. Perusurapäästöt muodostuvat kaupan kylmälaitteiden, rakennusten ilmastoinnin ja lämpöpumppujen, teollisuuden kylmälaitteiden sekä ajoneuvojen ilmastoinnin käytön seurauksena. Päästövähennyskeinoina on siten tarkasteltu näiden lähteiden päästöjen vähentämistä korvaavien laitteiden ja tuotteiden markkinoille saattamista edistämällä. Päästövähennyspotentiaalit on arvioitu siten, että kaupan kylmälaitteiden osuus perusurapäästöistä on 50 prosenttia, rakennusten ilmastoinnin ja lämpöpumppujen osuus 17 prosenttia, teollisuuden kylmälaitteiden osuus 12 prosenttia ja ajoneuvojen ilmastoinnin osuus 10 prosenttia. Päästölähteiden osuudet on laskettu Alajan vuodelle 2020 esittämi- en ennusteiden perusteella (Alaja, 2009).

Mallissa on käytetty Alajan kokoamien arvioiden keskimääräisiä päästövähennyskus- tannuksia. Tällöin kaupan kylmälaitteiden vähennyskustannukset ovat 19 €/t CO₂-ekv, rakennusten ilmastoinnin ja lämpöpumppujen vähennyskustannukset 74 €/t CO₂-ekv, teollisuuden kylmälaitteiden vähennyskustannukset 46 €/t CO₂-ekv ja ajoneuvojen il- mastoinnin vähennyskustannukset 85 €/t CO₂-ekv. (Alaja, 2009)

3.7 Energian hintaennusteet

Mallissa monen vähennyskeinon kustannukset riippuvat polttoaineiden hintakehitykses- tä, minkä vuoksi niille on mallissa muodostettu ennusteet. Arviot esimerkiksi raakaöljyn hinnan tulevasta kehityksestä vaihtelevat kuitenkin suuresti. Työssä käytettiin raakaöl- jyn verottoman, vuoden 2020 hinnasta IEA:n esitettyjä ennusteita, jotka on esitetty tau- lukossa 3. (IEA, (WEO), 2009; EIA, 2010). Ennusteiden perusteella on sovitettu vuoden 2020 raakaöljyn hintaa kuvaava normaalijakauma. Hintakehitystä on kuvattu satunnais- kulun avulla siten, että vuoden 2010 raakaöljyn hintaan ei liity epävarmuutta, mutta vuoden 2020 hintaan liittyy. Tällöin välille muodostetaan satunnaiskulun avulla muo- dostettu ennuste, jossa epävarmuutta kuvaava jakauma levenee tasaisesti siten, että vuonna 2020 se vastaa ennusteiden perusteella muodostettua normaalijakaumaa. Mallis- sa dieselin hinnan on arvioitu kehittyvän raakaöljyn hintakehitystä seuraten siten, että diesel arvioidaan aiemman tutkimuksen perusteella 20 % raakaöljyä kalliimmaksi. Die- selin ja raakaöljyn markkinahintojen suoraa riippuvuutta käytetään, koska hintojen his- toriatietojen perusteella laskettu korrelaatio on korkea ($R^2=99\%$). (Ekholm 2010b)

3. Päästölähteet ja -vähennyskeinot

Taulukko 3. Raakaöljyn maailmanmarkkinahinnan ennusteita vuodelle 2020,

Skenaario	Hinta [dollaria/barreli]
EIA, Low (EIA, 2010)	51
EIA, Reference (EIA, 2010)	120
EIA, High (EIA, 2010)	215
WEO 2009 Reference (IEA, 2009)	100
WEO 2009 450 ppm (IEA, 2009)	90

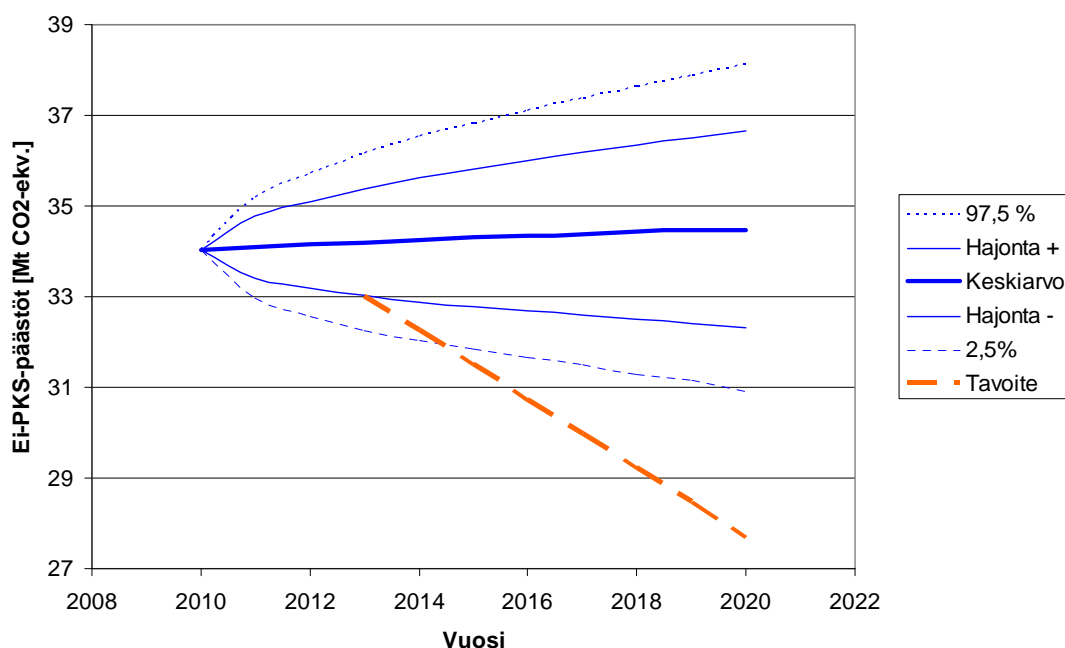
Maakaasun hinnalle vuonna 2020 on muodostettu normaalijakauma kirjallisuudessa esitettyjen arvioiden perusteella muodostamalla historiallisten hintatietojen perusteella lineaarinen sovite hinnan kehittymiselle aikavälillä 2010–2020. Tällöin mallissa vuoden 2010 hinta on 7,2 €/GJ ja vuonna 2020 odotusarvoisesti 10,7 €/GJ. (Energiamarkkinavirasto). Maakaasulle muodostetaan raakaöljyn tavoin satunnaiskulun avulla levenevä jakauma siten, että vuoden 2020 hintaan liittyvä hajonta on noin 10 %.

Mallissa metsätähdedieselin hinta on muodostettu metsähakkeen hinnan ja metsätähdedieselin tuotantokustannusten summana. Mallissa on käytetty kaikille vuosille metsätähdedieselin tuotantokustannuksista arviota 9,3 €/GJ ja tuotannon hyötysuhteeksi 60 % (McKeough ym., 2008). Työssä kustannukset noudattavat normaalijakaumaa, jonka hajonta on 10 %. Metsähakkeen hinnalle on muodostettu ennuste käyttämällä Vapon ilmoittamia hintatietoja vuosille 2000–2005 (Vapo, 2006) ja vuosille 2008–2010 Pöyryn ilmoittamia hintoja (Pöyry, puupolttoaineiden hintaseuranta). Aiempien hintatietojen perusteella muodostetaan lineaarisesti kehittyvä ennuste tulevien vuosien hinnalle. Näin saadaan vuodelle 2020 hinnan odotusarvoksi 7,53 €/GJ. Vuosille 2010–2020 muodostetaan satunnaiskulun avulla levenevä jakauma siten, että vuodelle 2020 ennustettu hinta noudattaa normaalijakaumaa, jonka hajontana on 10 %.

Työssä vuodelle 2020 käytetty sähkön hintaennuste perustuu aiemmissä tutkimuksissa vuoden 2030 hintaennusteisiin sovitettuun jakaumaan (Forsström ym., 2010). Tällöin mallissa satunnaiskulun avulla saatu vuoden 2020 hintaa kuvaava jakauma noudattaa normaalijakaumaa keskiarvolla 56 €/MWh ja keskihajonnalla 8,5 €/MWh.

4. Tulokset

Kuvassa 3 on esitetty mallilla muodostettu päästökaupan ulkopuolisten sektoreiden perusuran mukaisten kokonaispäästöjen kuvaaja luottamusväleineen ajan funktiona. Lisäksi kuvassa on esitetty, kuinka päästöjen tulisi tavoitteen mukaisesti vähentyä vuoteen 2020 mennessä, mikäli päästöjen vähentäminen aloitetaan vuonna 2010.



Kuva 3. Suomen ei-PK-sektorin päästöjen perusura mallissa ja EU:n asettama tavoite. Perusurapäästöjen odotusarvon kehitys on esitetty käyrällä "keskiarvo". Käyrät "hajonta +" ja "hajonta -" kuvaavat väliä, jolla päästöt ovat kunakin vuonna todennäköisyydellä 68 %. Vastaavasti perusurapäästöt ovat käyrien "2,5 %" ja "97,5 %" välillä todennäköisyydellä 95 %. Kuvassa punaisella on esitetty päästötavoitteen mukainen päästöjen kehittyminen.

Kuvasta 3 nähdään, että vuodesta 2010 eteenpäin ennustettuihin perusurapäästöihin liittyy epävarmuutta, joka on esitetty ajan funktiona levenevänä jakaumana. Kuvasta 3

4. Tulokset

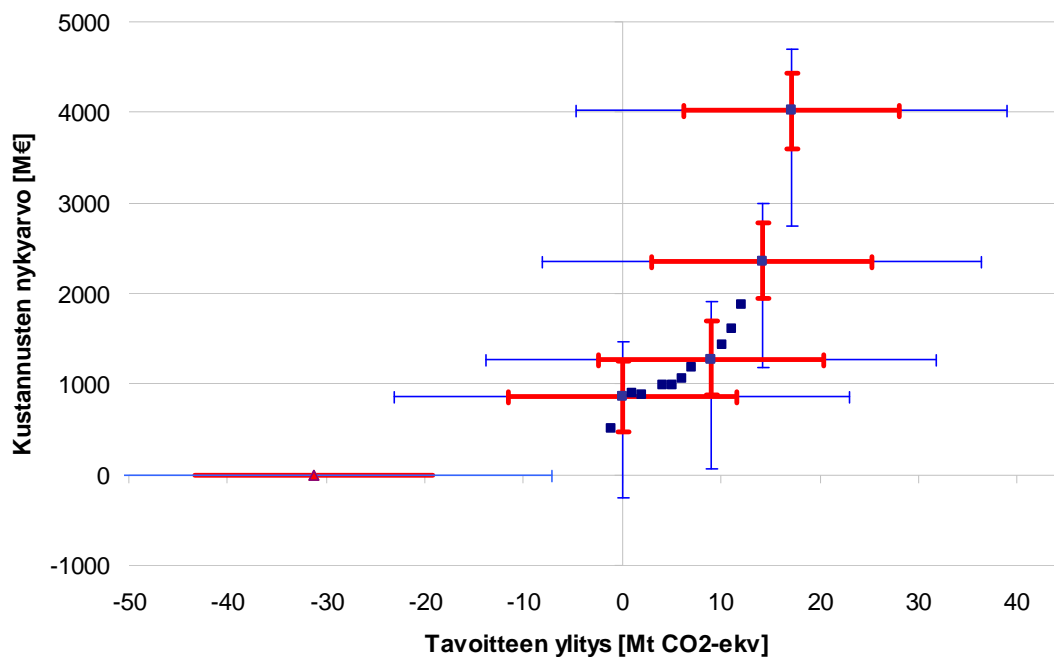
huomataan myös, ettei perusuralla saavuteta vuodelle 2020 asetettua tavoitetta ja perusurapäästöjen odotusarvo on vuonna 2020 noin 6 Mt CO₂-ekv enemmän kuin tavoite. Vuotuisten vähennystavoitteiden täyttämässä on mahdollista käyttää ajallisia joustomekanismeja, joten vuosille 2013–2020 vähennystavoite on kumulatiivinen. Mallilla lasketun perusuran luottamusväli on melko leveä. Perusuran päästöt sisältävät siis merkittävää epävarmuutta, mikä vaikuttaa myös päästövähennyskeinojen, joiden vähennyspotentiaaleissa on käytetty perusuran päästöjä, avulla toteutuvien päästövähennysten epävarmuuteen.

Työssä tutkitaan, millaisista toteutettavista vähennyskeinoista aloitusajankohtineen muodostuvat porfoliot ovat Pareto-tehokkaita tilanteessa, jossa päästövähennykset on tehtävä kansallisin vähennystoimin ja tilanteessa, jossa vuonna 2020 voidaan hyödyntää jäsenmaiden välistä joustomekanismia päästökiintiöillä käytävästä kaupasta. Lisäksi tutkitaan, millaisia epävarmuuksia Pareto-tehokkaiden portfolioiden kustannuksiin ja niillä saavutettaviin päästövähennyksiin liittyy ja ovatko epävarmuudet erilaisia eri tilanteissa. EU:n Suomelle asettaman vähennystavoitteen saavuttamisen todennäköisyyttä ja sen riippuvuutta kustannusten nykyarvosta tutkitaan portfolioiden, joissa päästövähennykset saavutetaan kansallisin vähennystoimin, osalta. Lisäksi tarkastellaan, voidaanko portfolioilla saavutettaviin päästövähennyksiin liittyvää riskiä pienentää, jos sallitaan kustannusten odotusarvon nouseminen.

Toteutettaviksi valitut keinot voivat muuttua, mikäli päästökiintiöillä voidaan käydä kauppaa jäsenmaiden välillä vuosina 2013–2020. Toteutettavien keinojen valinnan lisäksi tutkitaan, millaiset porfoliot ovat kustannusten minimoinnin kannalta optimaalisia tilanteessa, jossa päästökiintiöillä voidaan käydä kauppaa ja tilanteessa, jossa vähennykset tehdään vähennystoimin. Optimaalisten portfolioiden ominaisuuksia vertaillaan kustannusten ja saavutettavien päästövähennysten odotusarvojen ja epävarmuuksien näkökulmasta. Lisäksi verrataan, miten toteutettavat keinot ja aloitusajankohdat eroavat näissä optimaalisissa portfolioissa.

4.1 Optimaaliset porfoliot ominaisuuksineen, kun huomioituna vain ajalliset joustot

Kuvassa 4 on esitetty mallilla saatavat, kustannusten ja päästömäärien odotusarvojen perusteella optimaaliset porfoliot, kun päästöoikeuksilla käytävää kauppaa ei ole huomioitu. Kuvaa 4 vastaavassa tilanteessa on kuitenkin voitu hyödyntää ajallisia joustoja.



Kuva 4. Kustannustehokkaiden päästövähennysportfolioiden kumulatiivinen päästötavoitteen ylitys välillä 2013-2020 sekä portfolion kustannusten nykyarvo välillä 2013–2020. Valituille portfolioille on esitetty 68% luottamusväli punaisella ja 95% luottamusväli sinisellä. Käyrän päätepisteet kuvaavat portfolioita, joissa ei aloiteta mitään vähennystoimia tarkasteluvälillä (vasemmanpuolimmaisista pisteistä), tai jossa kaikki toimet aloitetaan 2010 (oikeanpuolimmainen piste). Tavoite saavutetaan odotusarvoisesti noin 860 M€ kustannusten nykyarvolla.

Kuvassa 4 x-akselina on päästötavoitteen kumulatiivinen ylitys, joka kuvaa, kuinka paljon enemmän päästöjä on kumulatiivisesti vähennetty verrattuna vuosille 2013–2020 asetettuun tavoitteeseen. Pisteet, joilla on negatiivinen tavoitteen ylityksen arvo, ovat siten portfolioita, joilla asetettua tavoitetta ei odotusarvoisesti saavuteta. Kuvassa y-akselina on portfolion kokonaiskustannusten nykyarvo. Pisteillä on esitetty optimoinnilla löydettyjen Pareto-tehokkaiden portfolioiden kustannusten ja tavoitteen ylityksen odotusarvot. Lisäksi kuvaan on merkitty neljään portfolioon kustannusten ja tavoitteen ylityksen epävarmuusvälit, kun käytetään 68 prosenttia (punaisella) ja 95 prosenttia (sinisellä) luottamusvälejä.

Optimaalisten portfolioiden lisäksi kuvassa on esitetty portfolio, jossa mitään vähennystoimia ei aloiteta tarkasteltavalla aikavälillä ja tämä vastaa pistettä, jossa kumulatiivisesta tavoitteesta jää puuttumaan odotusarvoisesti noin 31 Mt CO₂-ekv. Kuvassa tavoitteen ylitystä 17 Mt CO₂-ekv vastaa tilanne, jossa kaikki vähennystoimet aloitetaan vuonna 2010. Toisena käyrän päätepisteenä on esitetty portfolio, jonka tavoitteen ylitys on noin -1 Mt CO₂-ekv ja josta tehtäviä päästövähennystoimia ei voida enää vähentää siten, että vuotuiset tavoitteet täyttyisivät.

4. Tulokset

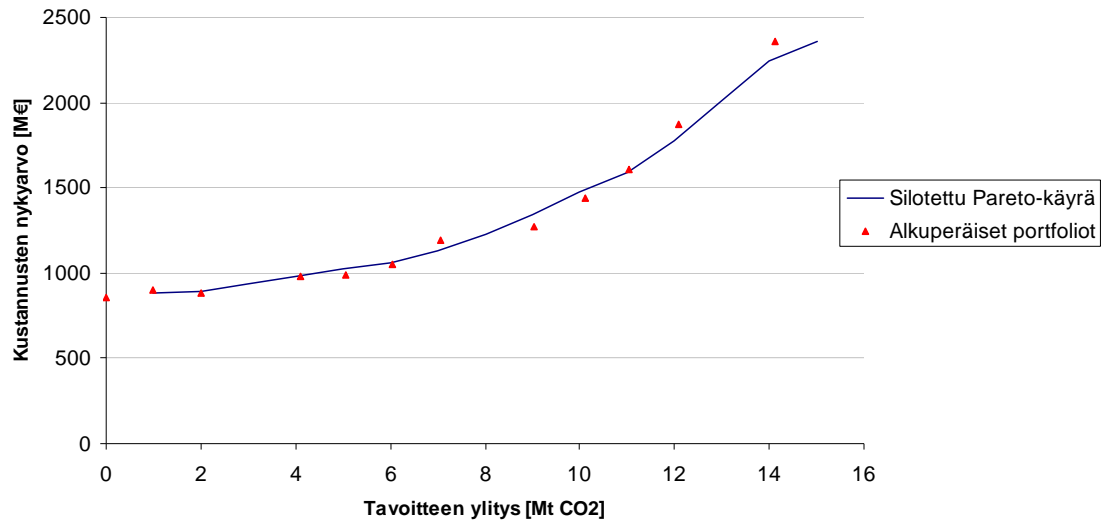
Kustannusten epävarmuus ei merkittävästi muutu eri päästötasoilla kuten kuvasta 4 havaitaan. Lisäksi huomataan, että kustannusten jakauma on vino siten, että pitempi häntä on odotusarvoa pienempien kustannusten suuntaan. Tällöin voidaan päätellä, että kustannusten odotusarvon ylitys on lyhyellä välillä ja siten kustannusten ylitys ei todennäköisesti ole suuri. Toisaalta kuvasta huomataan, että pienillä kustannustasoilla suhteellinen hajonta odotusarvoon verrattuna on suurempi kuin suuremmilla kustannustasoilla, koska poikkeaman suuruus pysyy lähes vakiona kaikissa tarkasteltavissa portfolioissa.

Kuvasta 4 huomataan, ettei saavutettujen päästövähennysten epävarmuus merkittävästi muutu eri päästötasoilla. Toisaalta havaitaan myös, että tavoitteen ylitystä kuvaavien päästöjen vaihtelu on jakautunut symmetrisesti odotusarvon ympärille lähes normaalijakaumaa noudattaen. Vaihteluvälin pituus on lähes sama kaikissa portfolioissa, joten tavoitteen ylityksen suuremmilla tasoilla odotusarvoon verrattut suhteelliset vaihtelut ovat pienempiä kuin pienemmällä tavoitteen ylityksen tasolla. Kuvasta 4 huomataan myös, että kaikilla portfolioilla on 95 %:n luottamusvälillä riski olla saavuttamatta päästötavoitetta, koska niiden luottamusväleihin sisältyy myös negatiivisia tavoitteen ylityksen arvoja. Toisaalta tarkastelun perusteella on myös mahdollista saavuttaa merkittäviä tavoitteen ylityksiä, koska luottamusvälit ovat pitkiä myös positiivisen x-akselin suuntaan.

Tehokkaiden portfolioiden muodostaman Pareto-käyrän derivaatta, joka kuvaa marginaalisia vähennyskustannuksia, on kuvan 4 perusteella kasvava päästövähennysten määrän kasvaessa. Marginaaliset vähennyskustannukset kasvavat vähennettyjen päästöjen kasvaessa, koska portfolioihin valitaan kullakin päästötasolla kustannustehokkaimmat, ts. marginaalikustannuksiltaan pienimmät päästövähennyskeinot.

Kuvasta 4 havaitaan, että Pareto-tehokkaita portfolioita yhdistävä käyrä on rosainen². Koska tällöin käyrän derivaatta vaihtelee pisteiden välillä merkittävästi ollen välillä positiivinen ja välillä negatiivinen, käyrälle tehtiin keskimääräisen derivaatan arvioimiseksi sileä sovite. Sovitteen derivaatan avulla voidaan arvioida, miten marginaaliset vähennyskustannukset kehittyvät vähennettyjen päästöjen funktiona. Tasoittamisessa käytetään kernel-menetelmää, jolla muodostetaan lähimpiä havaintoarvoja painottaen tasoitettu sovite. Sopiva ikkunan leveys määrätään tällöin kokeilemalla siten, että eri leveyksiä vastaavia kuvaajia verrataan alkuperäisiin portfolioiden sijaintiin. Tällöin saadaan kuvan 5 mukainen sovite. Kernel-menetelmässä ikkunan leveytenä on käytetty arvoa 2,7 Mt CO₂-ekv..

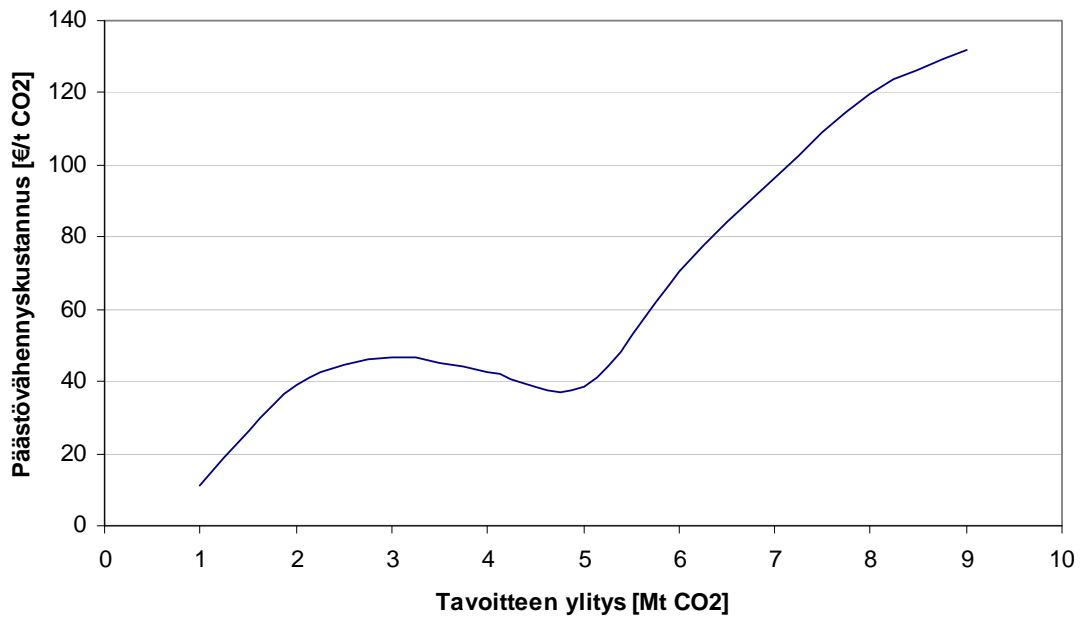
² Mallissa keinot toteutetaan kokonaan tai ei lainkaan, minkä vuoksi eri portfolioiden odotusarvot voivat saada vain tiettyjä arvoja eikä pinnalle siksi voida muodostaa jatkuvaa derivaattaa.



Kuva 5. Kustannustehokkaiden portfolioiden päästötavoitteen ylitys ja kustannusten nykyarvo sekä portfolioista Kernel-menetelmällä laskettu sileä sovite, kun päästövähennykset saavutetaan kansallisin vähennyskeinoin ajallisia joustoja hyödyntäen. Kuvassa x-akselina päästötavoitteen kumulatiivinen ylitys ja y-akselina koko portfolion aiheuttamien kustannusten nykyarvo välillä 2013–2020.

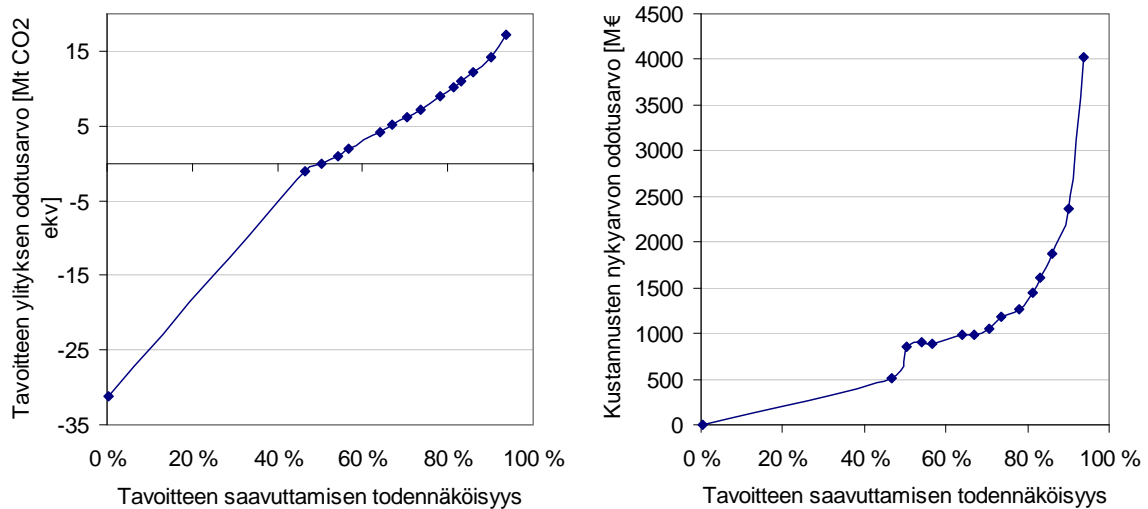
Tasoitettun Pareto-käyrän perusteella lasketaan marginaalikustannukset käyrän kahden toisiaan lähellä olevan pisteen välille muodostetun suoran kulmakertoimen avulla. Vähennysten marginaalikustannukset on kuvassa 6 esitetty vuosien 2013–2020 päästötavoitteen kumulatiivisen ylityksen funktiona.

4. Tulokset



Kuva 6. Kustannustehokkaista portfolioista arvioitu marginaalinen päästövähennyskustannus kumulatiivisen tavoitteen ylityksen funktiona, kun alkuperäisten portfoliopisteiden välinen käyrä on siloitettu Kernel-menetelmällä kuvan 5 mukaisesti.

Kuvasta 6 nähdään, että päästövähennyskustannukset kasvavat, kun tavoitteen ylitys ja siten vähennettyjen päästöjen määrä kasvaa. Tällöin voidaan päätellä, että Pareto-tehokkaissa portfolioissa valitaan keinot kustannustehokkuuden määräämässä järjestyksessä. Lisäksi huomataan, että käyrän derivaatta kasvaa lähes kaikkialla, kun tavoitteen ylitys kasvaa. Tällöin keinojen vähennyskustannukset kasvavat suhteellisesti enemmän, kun tavoitteen ylityksen taso kasvaa. Kun tavoitteen ylitys on välillä 3–5 Mt CO₂-ekv, huomataan, että kuvan 6 käyrällä on paikallinen minimi. Minimi syntyy, koska optimointi tehdään kokonaiskustannusten minimoinnin kannalta kullakin tavoitteen ylityksen tasolla. Tällöin voi yksittäisissä tapauksissa olla edullisempaa toteuttaa päästövähennyskeinoja, jotka eivät ole muihin valittaviin keinoihin nähden kaikkein edullisimpia, mutta joilla tavoite saavutetaan täsmällisemmin.



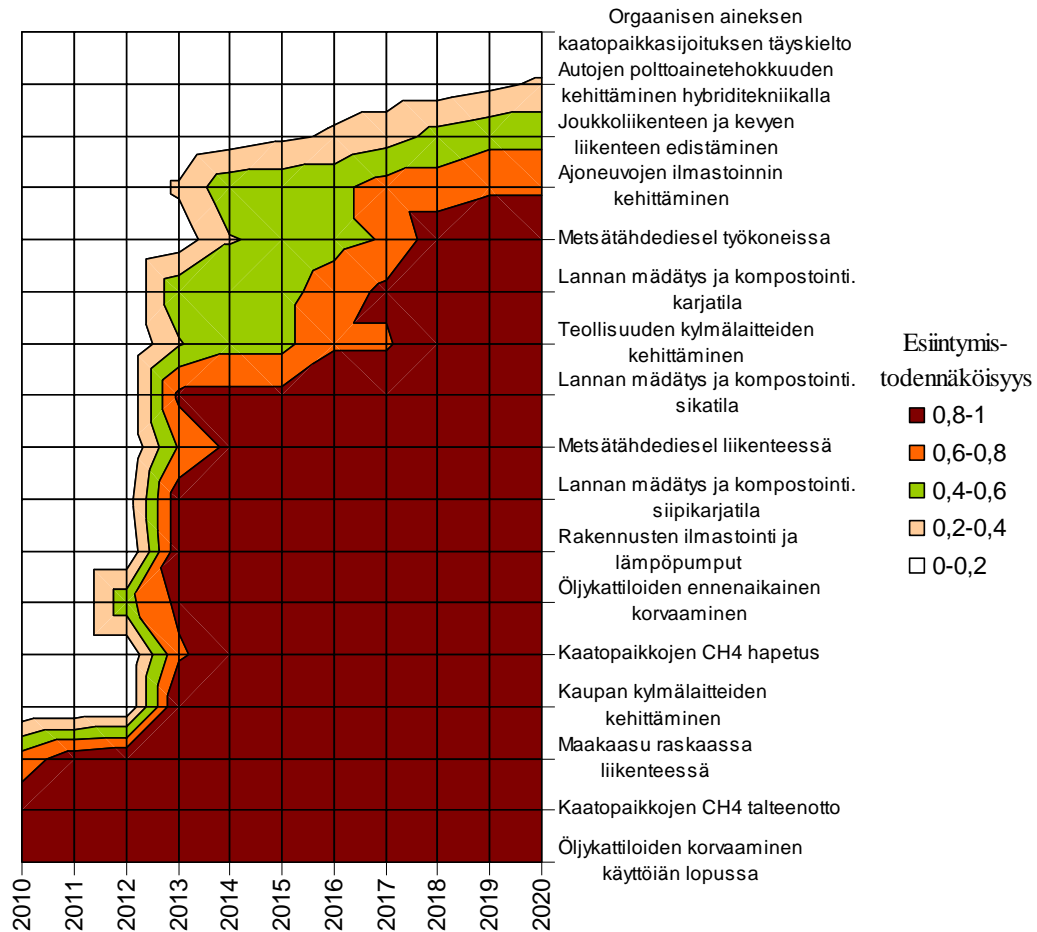
Kuva 7. Kustannustehokkaiden portfoliojen todennäköisyys saavuttaa päästötavoite ja odotusarvot portfolioihin liittyvistä kumulatiivisen päästötavoitteen ylityksistä sekä kokonaiskustannusten nykyarvosta.

Kuvassa 7 on esitetty edellä tarkasteltujen optimaalisten portfoliojen todennäköisyyttä saavuttaa vuodelle 2020 asetettu päästötavoite. Todennäköisyys on esitetty kumulatiivisen tavoitteen ylityksen sekä kustannusten nykyarvon odotusarvon funktiona. Odotusarvoisesti (vastaa tässä 50 % todennäköisyyttä) tavoitteen saavuttava optimiportfolio vastaisi netto nykyarvoltaan noin 860 M€ kustannustasoa välillä 2010–2020. Mikäli tavoitteen saavuttamistodennäköisyys halutaan nostaa esimerkiksi tasolle 68 %, vastaisi tämä odotusarvoisesti päästötavoitteen 5 Mt CO₂-ekv. kumulatiivista ylitystä ja 990 milj. € kustannustasoa. Tätä suuremmilla todennäköisyyden arvoilla kustannukset nousevat nopeasti. Erityisesti todennäköisyyden 80 % jälkeen käyrä on jyrkästi nouseva eli pienikin todennäköisyyden kasvattaminen vaatii suhteellisen suuria kustannuksia. Kuvasta 7 havaitaan siten, että kustannukset, joilla voidaan pienentää riskiä olla saavuttamatta asetettua tavoitetta, nousevat, kun tavoitteen saavuttamisen todennäköisyys kasvaa.

Kuvan 7 todennäköisyyskäyrän suurin arvo vastaa tilannetta, jossa kaikki toimet aloitetaan vuonna 2010. Tällöin todennäköisyys saavuttaa tavoite on noin 94 %, joten kaikkiin portfolioihin, jotka mallilla voidaan muodostaa, liittyy riski olla saavuttamatta asetettua tavoitetta. Käyrän minimiä vastaa tilanne, jossa mitään vähennyskeinoa ei toteuteta tarkasteltavalla aikavälillä. Todennäköisyys saavuttaa asetettu tavoite toteuttamatta mitään tarkasteltua vähennyskeinoa on noin 0,4 %. Vähennyskeinojen toteuttaminen tavoitteen saavuttamiseksi on siten välttämätöntä saatujen tulosten perusteella.

Kuvassa 8 on esitetty, kuinka monessa tarkastellussa portfolioissa kukin keino esiintyy eri vuosina. Kuvassa 8 on esitetty, kuinka monessa Pareto-tehokkaassa portfolioissa keino tarkasteltavina vuosina toteutetaan tai on toteutettu jo aiemmin.

4. Tulokset



Kuva 8. Keinojen esiintymistodennäköisyys tehokkaissa portfolioissa eri vuosina, kun vähennykset tehtävä kansallisin vähennyskeinoin vain ajallisia joustomekanismeja hyödyntäen. Värit kuvaavat sitä, kuinka monessa portfolioissa kukin keino eri vuosina toteutetaan tai on toteutettu jo aiemmin.

Kuvasta 8 havaitaan, että jotkin keinot toteutetaan lähes jokaisessa portfolioissa aikavälin alussa. Toisaalta mallissa tarkasteltujen vähennyskeinojen joukossa on myös keinoja, joita ei toteuteta lainkaan tai vain muutamassa tarkastelussa optimaalisessa portfolioissa. Tällaisten keinojen vähennyskustannusten voidaan arvioida olevan tällöin huomattavasti suuremmat kuin useammin valituiksi tulleiden keinojen. Kuvassa 8 esitetyt tulokset kuvaavat siten eräällä tavalla eri keinojen kustannustehokkuuden eroja.

Kuvasta 8 huomataan, että lähes kaikissa Pareto-tehokkaissa portfolioissa toteutetaan öljykattiloiden korvaaminen käyttöään lopussa, kaatopaikkojen metaanin talteenoton lisääminen sekä maakaasun käytön lisääminen raskaassa liikenteessä. Kustannustehokkaita ja siten usein optimaalisissa portfolioissa esiintyviä keinoja ovat myös metsätäh-

4. Tulokset

dedieselin käytön lisääminen liikenteen polttoaineena, lannan mädätyksen ja kompostoinnin kehittäminen sikatiloilla sekä teollisuuden kylmälaitteiden korvaaminen. Toisaalta tarkastelluissa optimaalisissa portfolioissa hyvin harvoin tulevat toteutetuiksi orgaanisen aineksen kaatopaikkasijoituksen täyskielto ja autojen polttoainetehokkuuden kehittäminen. Muiden keinojen toteuttaminen riippuu tavoitellusta päästötasosta ja näin ollen niiden toteuttaminen ja toteuttamisen ajankohta vaihtelee eri päästötasoja vastaavissa portfolioissa. Kuvan 8 perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että esimerkiksi kaatopaikkojen metaanin hapetus ja öljykattiloiden ennenaikainen korvaaminen ovat kustannustehokkaampia päästövähennyskeinoja kuin ajoneuvojen ilmastonmuutoksen muuttaminen tai joukkoliikenteen ja kevyen liikenteen edistäminen.

Saaduista tuloksista havaitaan, että kaikissa tarkasteluissa Pareto-tehokkaissa portfolioissa päästöihin liittyvät epävarmuutta kuvaavat keskihajonnat ovat lähes yhtä suuret. Taulukossa 4 on tarkasteltu, voidaanko kustannusten odotusarvoa kasvattamalla pienentää toteutuviin päästöihin liittyvää keskihajontaa. Tällöin optimoinnissa on asetettu saavutettujen päästövähennysten keskihajonnalle yläraja, jolloin tuloksena on saatu Pareto-käyrän sisäpisteitä. Taulukossa 4 on vertailtu pareittain samaa päästötasoa vastaavien ratkaisuiden päästöihin liittyviä keskihajontoja sekä kustannusten odotusarvoja.

Taulukko 4. Portfolion päästövähennyksien epävarmuudet ja kustannusten nykyarvojen odotusarvot. Keskihajonnan pienentäminen nostaa kustannuksia huomattavasti.

Tavoitteen ylitys [Mt CO ₂]	Tavoitteen ylityksen keskihajonta	Kustannusten nykyarvon odotusarvo [M€]
7,6	10,9	3240
7,1	11,4	1170
6,5	11,1	3060
6,0	11,5	1040

Taulukosta 4 huomataan, että tavoitteen ylityksen tasolla 7–8 Mt CO₂-ekv kustannukset minimoituvat ylityksellä 7,1 Mt CO₂-ekv, jolloin kustannusten nykyarvon odotusarvo on 1170 M€ Kun vähennettyihin päästöihin liittyvää keskihajontaa pienennetään tällä tasolla, kustannukset nousevat 3240 miljoonaan euroon ja keskihajonta pienenee 0,5:llä. Tasolla 6–7 Mt CO₂-ekv kustannusten nykyarvon minimi on 1040 M€ Kun tähän portfolioon liittyvää riskiä pienennetään 0,4:llä, kustannukset nousevat 3060 miljoonaan euroon. Molemmissa tapauksissa huomataan, että pieni keskihajonnan pienentäminen nostaa kustannukset lähes kolminkertaisiksi. Saavutettuihin päästövähennyksiin liittyvää epävarmuutta ei voida siten merkittävästi pienentää kustannuksia nostamalla ja pienetkin keskihajonnan pienennykset nostavat kustannuksia huomattavasti. Mallissa

4. Tulokset

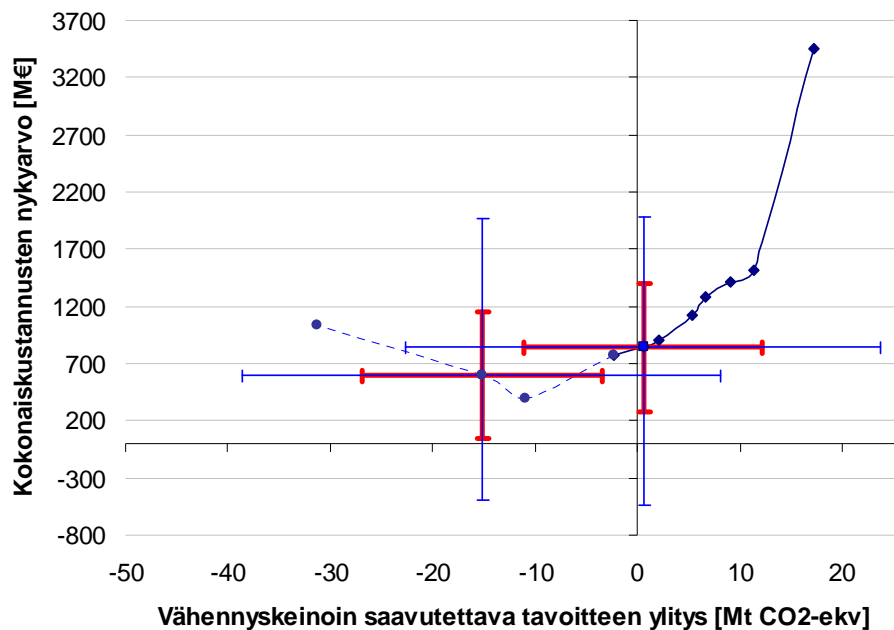
muuttujien epävarmuudet on arvioitu samankaltaisiksi, jolloin muodostamalla erilaisia portfolioita ei voida merkittävästi vaikuttaa toteutuvien päästöjen epävarmuuteen. Mikäli tarkasteltavat keinot sisältäisivät erisuuntaisia vaihteluita, voitaisiin niistä teoriassa muodostaa portfolio, jossa riski pienenesi, kun muuttujien erisuuntaiset vaihtelut kumoaisivat toistensa vaikutuksia. Muuttujien epävarmuuksien tarkempi tunteminen ja kuvaaminen mallissa voisi siten muuttaa taulukossa 4 tehtyä tarkastelua vastaavia tuloksia.

4.2 Optimaaliset portfoliot ominaisuuksineen ei-PKS-päästökaupan tilanteessa

Kuvassa 9 on esitetty, millainen Pareto-käyrä saadaan, kun ajallisten joustojen lisäksi huomioidaan, että vuonna 2020 päästökaupalla voidaan käydä jäsenmaiden välillä kauppaa. Epävarmuudet on esitetty kahdelle optimaaliselle portfoliolle siten, että punainen viiva kuvaa 68 prosentin luottamusväliä ja vaaleansininen viiva 95 prosentin luottamusväliä. Pareto-käyrän päätepiisteet on muodostettu samoin kuin edellisessä tarkastelussa siten, että kaikki keinot toteutetaan vuonna 2010, jolloin vähennyskeinoin saavutettava kumulatiivinen tavoitteen ylitys on noin 17 Mt CO₂-ekv. Mikäli mitään kansallista vähennystoimea ei aloiteta tarkasteltavalla aikavälillä, on vähennyskeinoin saavutettava kumulatiivinen tavoitteen ylitys noin -31 Mt CO₂-ekv. Tällöin kustannukset ovat noin 1000 miljoonaa euroa, koska päästökauppiä ostetaan tällöin odotusarvoisesti määrää, joka jäätiin tavoitteen alle.

Kuvasta 9 havaitaan, että kustannukset nousevat lähes lineaarisesti tavoitteen ylityksen funktiona, kun tavoitteen ylitys on välillä -2–10 Mt CO₂-ekv. Kuvaan on merkitty katkoviivalla väli, jolla vuotuisia tavoitteita ei saavuteta kansallisin vähennyskeinoin. Kun vuotuiset tavoitteet pyritään saavuttamaan kansallisin vähennyskeinoin, kustannukset minimoituvat, kun päästökauppiä ostetaan 2,3 CO₂-ekv. Toisaalta jos päästökaupalla käytävä kauppa on mahdollista kaikkina vuosina siten, ettei vuotuisia tavoitteita tarvitse täyttää vähennyskeinoja toteuttamalla, minimoituvat kustannukset, kun ostetaan päästökauppiä yhteensä noin 11 Mt CO₂-ekv.

Kuvassa on esitetty myös tapaus, jossa mitään toimea ei aloiteta tarkasteltavalla aikavälillä. Tämä vastaa kuvassa pistettä, jossa vähennyskeinoin saavutettava tavoitteen ylitys on noin -31 Mt CO₂-ekv. Tällöin kaikki aikavälillä 2013–2020 tarvittavat vähennykset korvataan päästökauppiä ostamalla eri vuosina siten, että vuotuiset ja vuoden 2020 tavoitteet täyttyvät. Mikäli kaikki tarvittavat vähennykset korvataan päästökauppiä ostamalla, ovat kustannukset korkeammat kuin tapauksissa, joissa osa vähennyksistä toteutetaan kansallisin vähennyskeinoin. Sellaisten vähennyskeinojen, joiden vähennyskustannukset ovat päästökauppiä hintaa pienemmät, toteuttaminen on kokonaiskustannusten kannalta edullisempää kuin kaikkien tarvittavien vähennysten korvaaminen päästökauppiä ostamalla.



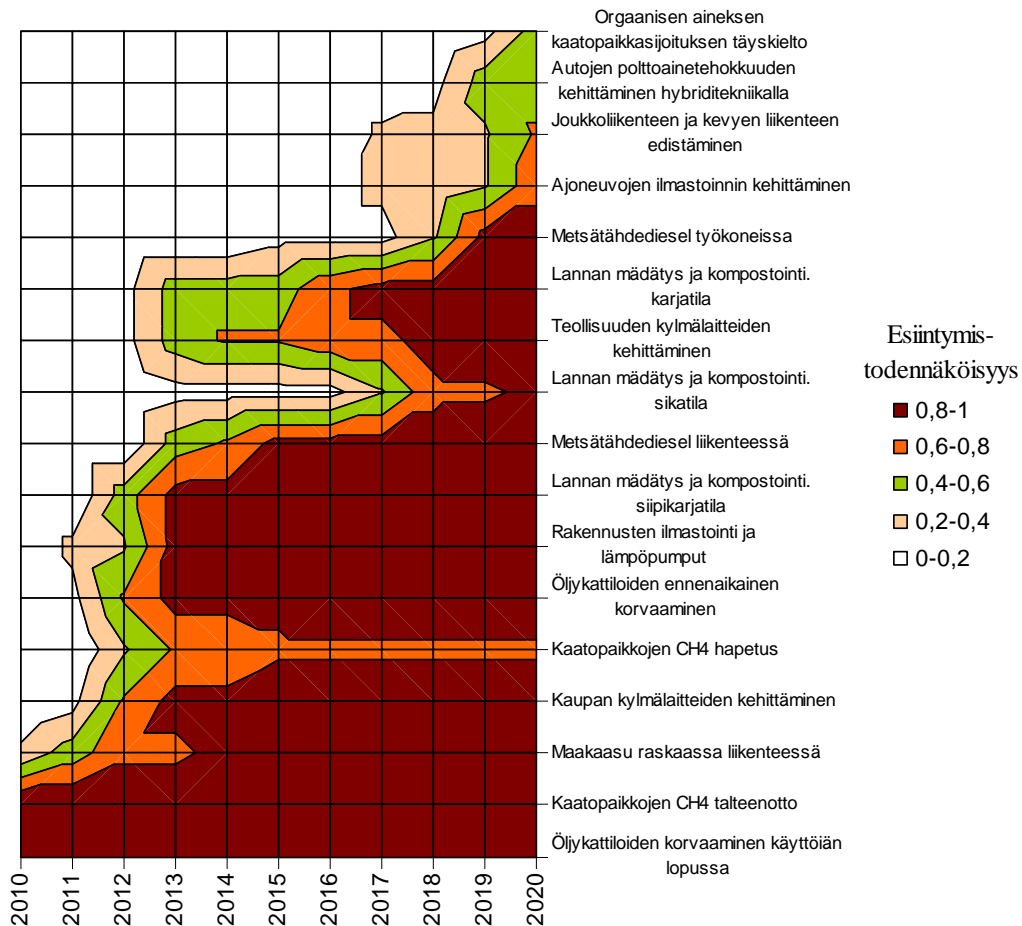
Kuva 9. Kustannustehokkaat portfoliot, kun päästökaupalla voidaan käydä kauppaa. X-akseli kuvaa Suomessa toteutettavien vähennyskeinoin saavutettavaa kumulatiivista päästötavoitteen ylitystä, jolloin erotus suhteessa nollakohtaan vastaa ostettavien (negatiiviset x-akselin arvot) tai myytävien (positiiviset x-akselin arvot) päästöoikeuksien määrää. Punaisella on esitetty luottamusväli 68 % ja sinisellä 95 %:n luottamusväli. Katkoviivalla on merkitty väli, jolla vuotuisia tavoitteita välillä 2013–2020 ei saavuteta kansallisin vähennyskeinoin, vaan ostamalla eri vuosina päästökaupalla.

Työssä oletetaan, että päästöoikeuksia voidaan ostaa tai myydä ilman rajoituksia. Tällöin ostettavien tai myytävien päästöoikeuksien määrä vaikuttaa toteutuvien päästöjen jakauman keskiarvoon ja siten jakauman sijaintiin, mutta ei juurikaan itse jakauman muotoon eikä siten saavutettavien päästövähennysten epävarmuuteen. Toisaalta päästökaupan hinta on epävarma, mikä vaikuttaa kustannusten nykyarvoa kuvaavaan jakauman leventäen sitä erityisesti odotusarvon ylittävien kustannusten suuntaan. Mitä enemmän päästökaupalla käydään kauppaa, sitä leveämpi on kustannusten epävarmuutta kuvaava jakauma.

Kuvassa 10 on esitetty, kuinka monessa kustannustehokkaassa portfolioissa kukin vähennyskeino esiintyy eri vuosina, kun ajallisten joustojen lisäksi voidaan käydä muiden jäsenmaiden kanssa kauppaa päästökaupalla, mutta vuotuiset tavoitteet tulee täyttää kansallisin vähennyskeinoin. Kuvassa erottuvat keinot, jotka toteutetaan lähes kaikissa Pareto-tehokkaissa portfolioissa aikavälin alussa. Tällaisia keinoja ovat esimerkiksi öljykattiloiden korvaaminen käyttöikänsä lopussa ja kaatopaikkojen metaanin talteenotto, jotka toteutettiin myös lähes kaikissa portfolioissa vuonna 2010, kun päästökaupalla ei voitu käydä kauppaa, kuten kuvasta 8 nähdään. Kuvasta 10 nähdään myös, että esimer-

4. Tulokset

kiksi orgaanisen aineksen kaatopaikkasijoituksen täyskielto, polttoainetehokkuuden kehittäminen sekä joukkoliikenteen ja kevyen liikenteen edistäminen ovat keinoja, jotka toteutetaan vain muutamassa Pareto-tehokkaassa portfolioissa, ja jotka aloitetaan vasta tarkasteluvälin lopussa. Sama tulos havaitaan myös kuvassa 8.



Kuva 10. Keinojen esiintymistodennäköisyys tehokkaissa portfolioissa eri vuosina, kun ajallisten joustojen ja kansallisesti tehtävien vähennyskeinojen lisäksi voidaan päästökaupalla käydä kauppaa muiden jäsenmaiden kanssa. Värit kuvaavat sitä, kuinka monessa tehokkaassa portfolioissa kukin keino eri vuosina toteutetaan tai on toteutettu jo aiemmin.

4.3 Jäsenmaiden välisten joustojen vaikutukset

Edellä on tarkasteltu tehokkaita portfolioita eri päästötasoilla tilanteissa, joissa joko huomioidaan jäsenmaiden väliset joustot tai niitä ei huomioida lainkaan. Rajoitusehtoja asettamalla on selvitetty eri tavoitteen ylityksen tasoja ja siten eri päästötasoja vastaavat portfolioit, joissa kokonaiskustannusten nykyarvo minimoituu. Päästötavoite täyttyy

4. Tulokset

kuitenkin odotusarvoisesti, mikäli tavoite saavutetaan 50 prosentin todennäköisyydellä. Tällaista portfoliota voidaan siten pitää optimointiongelman käypänä ratkaisuna. Tarkasteltavaksi muodostuu kaksi eri optimointitilannetta, jossa toisessa päästökaupalla voidaan käydä kauppaa ja toisessa tätä jäsenmaiden välistä joustoa ei huomioida.

Taulukossa 5 on tarkasteltu erillisinä tapauksina tilannetta, jossa päästökaupalla ei voida käydä kauppaa ja tilannetta, jossa päästökaupalla voidaan käydä kauppaa muiden jäsenmaiden kanssa joko koko aikavälillä tai vain vuonna 2020. Tilanteessa 1 päästökaupalla ei voida ostaa tai myydä, joten tavoite on saavutettava kansallisin vähennyskeinoin tarvittaessa ajallisia joustomekanismeja hyödyntäen. Tilanteessa 2 vähennystavoitteen saavuttamisessa voidaan vähennystoimien ja ajallisten joustojen lisäksi hyödyntää päästökaupalla käytävää kauppaa vuonna 2020 siten, että vuotuiset tavoitteet saavutetaan kansallisin vähennyskeinoin. Tilanteessa 3 voidaan ajallisten joustojen lisäksi käydä kaikkina vuosina päästökaupalla kauppaa, jolla voidaan siten korvata myös vuotuisista vähennystavoitteista jääminen. Optimoinnin avulla etsitään tilanteita 1 ja 2 vastaavat kustannukset minimoivat portfoliot. Taulukossa 5 on esitetty näiden portfolioiden kustannusten ja päästötavoitteen ylityksen odotusarvot sekä niihin liittyvä vaihteluvälit, kun luottamusvälinä on 95 %.

Taulukko 5. Optimiportfoliot tilanteessa 1, jossa vähennykset saavutettava kansallisin vähennyskeinoin ajallisia joustoja hyödyntäen, ja tilanteessa 2, jossa voidaan ajallisten joustojen ja kansallisten vähennyskeinojen lisäksi vuonna 2020 käydä kauppaa päästökaupalla muiden jäsenmaiden kanssa. Tällöin vuotuiset tavoitteet on kuitenkin saavutettava kansallisin vähennyskeinoin. Tilanteessa 3 voidaan hyödyntää ajallisia joustoja sekä käydä kaikkina vuosina päästökaupalla kauppaa, eikä vuotuisen tavoitteiden ole siten välttämätöntä täytyä vähennyskeinojen avulla. Optimiportfoliolla kustannukset minimoituvat, kun päästötavoite saavutetaan odotusarvoisesti. Taulukossa on kansallisin vähennyskeinoin saavutettavan tavoitteen kumulatiivisen ylityksen ja portfolion kokonaiskustannusten nykyarvon odotusarvot ja 95 %:n vaihteluvälit.

		Keski-arvo	Minimi	Maksimi	Välinpituus
Tavoitteen ylitys [Mt CO₂-ekv]	Ilman ei-PKS-päästökauppaa (tilanne 1)	0,0	-23,3	22,2	45,5
	Ei-PKS-päästökauppa mahdollista vain vuonna 2020 (tilanne 2)	-2,31	-25,1	20,9	46
	Ei-PKS-päästökauppa mahdollista kaikkina vuosina (tilanne 3)	-11,2	-34,1	12,1	46,2
Kustannusten nykyarvo [M€]	Ilman ei-PKS-päästökauppaa (tilanne 1)	860	-250	1470	1720
	ei-PKS-päästökauppa mahdollista vain vuonna 2020 (tilanne 2)	773	-290	1870	2160
	Ei-PKS-päästökauppa mahdollista kaikkina vuosina (tilanne 3)	450	-640	1740	2380

4. Tulokset

Taulukosta 5 havaitaan, että tilanteissa 2 ja 3 kustannusten nykyarvojen jakaumat ovat huomattavasti leveämpiä kustannusten ylityksen suuntaan kuin tilanteessa 1. Päästöoikeuden hintaa kuvaava todennäköisyysjakauma on symmetrinen normaalijakauma, minkä vuoksi tilanteissa 2 ja 3 kustannusten jakaumat levenevät tilanteen 1 kustannusten jakaumaan verrattuna. Tällöin tilanteissa 2 ja 3 odotusarvoisen kustannuksen ylitykset ovat suuremmat kuin tilanteessa 1. Vertaamalla tilanteita 2 ja 3 huomataan, että mikäli päästökauppiä voidaan ostaa koko aikavälillä (tilanne 3), on kustannusten jakauma hieman leveämpi kuin tilanteessa 2. Toisaalta tilanteessa 3 kokonaiskustannukset ovat noin 40 % pienemmät kuin tilanteessa 2. Vastaavasti koko aikavälillä päästökauppiä käyttävän kaupan mahdollisuus pienentää kokonaiskustannuksia noin 48 % verrattuna tilanteeseen, jossa vuotuiset ja vuoden 2020 tavoitteet tulee täyttää kansallisin vähennyskeinoin (tilanne 1). Tilanteessa 3 kustannukset ovat pienemmät kuin tilanteessa 1, koska mahdollisuus käydä päästökauppiä kauppaa koko aikavälillä estää tällöin marginaalisten kustannusten nousun päästökauppiä hintaa suuremmaksi.

Vertaamalla optimaalisissa portfolioissa esiintyvien keinojen toteutumista kuvien 8 ja 10 perusteella huomataan, että mahdollisuus ostaa tai myydä päästökauppiä vaikuttaa vähennyskeinojen valintaan. Tilanteessa 1 on optimaalista saavuttaa päästötavoite täsmällisesti ilman suuria tavoitteen ylityksiä, koska tilanteessa 1 tavoitteen yli tehtävät päästövähennykset nostavat kokonaiskustannuksia. Toisaalta tavoite tulee odotusarvoisesti saavuttaa, minkä vuoksi vähennyskeinoja on toteutettava, vaikka niiden vähennyskustannukset olisivat suuria. Sitä vastoin tilanteessa 2 suuret kansallisin vähennyskeinoin saavutetut tavoitteen ylitykset voivat pienentää kokonaiskustannuksia päästökauppiä myynnin vuoksi. Vastaavasti tilanteessa 2 voidaan olla saavuttamatta tavoitetta kansallisin vähennyskeinoin, mutta korvata tavoitteesta jääminen ostamalla päästökauppiä. Ostaminen tosin nostaa kokonaiskustannuksia, mutta mikäli päästöoikeuden hinta on vähennyskeinoilla saavutettavaa marginaalikustannusta pienempi, on päästökauppiä ostaminen tällöin edullisempi vaihtoehto. Tämän vuoksi tilanteissa 1 ja 2 toteutettavien vähennyskeinojen joukko on erilainen.

Kuvia 8 ja 10 vertaamalla huomataan myös, että päästökauppiä käyttävä kauppa siirtää joidenkin keinojen toteuttamista myöhemmäksi. Mallissa tarkastellaan kustannusten nykyarvoa, jonka laskemisessa huomioidaan käytetty korkokanta. Toisaalta päästöt siirtyvät vuodelta toiselle sellaisenaan ilman korkotekijän vaikutusta. Tämän vuoksi kustannusten minimoinnin kannalta on mielekästä siirtää toimien aloitusta ja siten niihin liittyviä kustannuksia mahdollisimman kauas tulevaisuuteen. Koska tilanteessa 2 vuonna 2020 päästötavoitetta ei ole välttämätöntä saavuttaa kokonaisuudessaan kansallisin vähennyskeinoin, on keinojen aloitusta mahdollista siirtää myöhemmäksi siten, että ainoastaan vuotuiset päästötavoitteet ajallisine joustoineen täyttyvät. Tilanteessa 1 vuoden 2020 päästötavoite on saavutettava kokonaisuudessaan kansallisin vähennyskeinoin, minkä vuoksi keinojen aloitusajankohdan siirtäminen myöhemmäksi on rajatumpaa kuin tilanteessa 2.

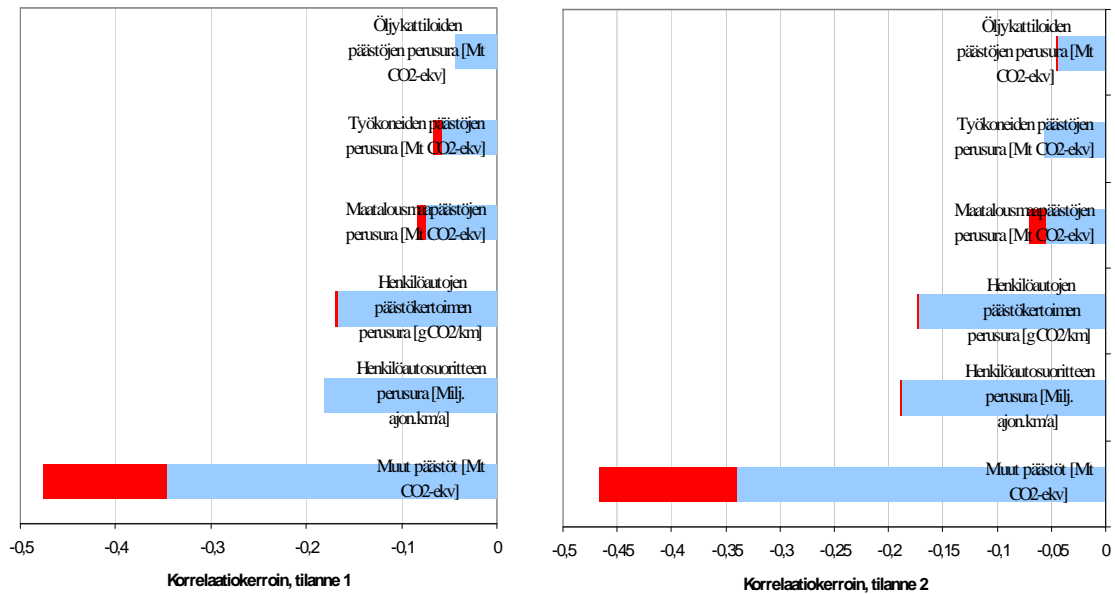
Kun verrataan kuvissa 4 ja 9 esitettyä Pareto-käyrän muotoa, havaitaan, että tilanteessa, jossa päästökaupalla voidaan käydä kauppaa, kustannukset nousevat lähes lineaarisesti vähennyskeinoilla saavutettavan tavoitteen ylityksen funktiona. Toisaalta jos päästökaupalla ei voida käydä kauppaa, riippuvuutta kuvaavan käyrän derivaatta on kasvava. Päästökaupalla käytävä kauppa täten mahdollistaa joustavuuden, jonka avulla voidaan vaihtaa yli tavoitteen tehtyjä vähennyksiä negatiivisiksi kustannuksiksi ja siten välttää kustannusten voimakas kasvu, kun päästövähennyksiä tehdään enemmän. Tällöin päästökaupan hinnan ja päästövähennysten marginaalikustannusten erotus määrää, milloin on kannattavampaa ostaa päästökaupalla kuin toteuttaa vähennyskeinoja. Tilanteessa 2 voidaan näistä valita edullisempi, mutta tilanteessa 1 tämä ei ole mahdollista, minkä vuoksi tilanteessa 1 optimaalisessa portfolioissa marginaaliset kustannukset kasvavat suuremmiksi kuin tilanteessa 2. Tällöin tilanteessa 2 voidaan optimaaliseen portfolioon valita toteutettavaksi ainoastaan keinoja, joiden vähennyskustannukset ovat pienemmät kuin päästökaupan hinta. Tilanteessa 1 vastaavaa valintaa ei voida tehdä, joten marginaaliset kustannukset kasvavat tällöin suuremmiksi kuin tilanteessa 2. Taulukosta 5 havaitaan, että tilanteessa 2 odotusarvoiset kustannukset ovat noin 87 M€ pienemmät kuin tilanteessa 1, joten päästökaupalla käytävän kaupan mahdollisuus pienentää kustannuksia noin 10 %.

4.4 Herkkyystarkastelu

Mallin muuttujat vaikuttavat eri tavoin saatuihin lopputuloksiin. Työssä tehdään tarkastelu vaikutusten voimakkuudesta taulukossa 5 esitettyihin eri tilanteita vastaaville optimaalisille ratkaisuille. Riippuvuuden voimakkuutta kuvataan Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimen avulla. Koska malli on dynaaminen, kunkin muuttujan vuotuisen arvon vaikutus lopputulokseen on hieman erilainen. Muuttujien vuotuiset vaikutukset on yhdistetty siten, että muuttujan riippuvuuden voimakkuutta kuvataan vuotuisten arvojen osoittamalla vaihteluvälillä. Riskit kustannusten ja päästövähennysten suhteen ovat toisistaan riippumattomia, minkä vuoksi herkkyysanalyysi tehdään molemmissa tilanteissa erikseen sekä kokonaiskustannusten nykyarvolle että saavutetuille päästövähennyksille.

Kuvassa 11 on esitettyä vuoden 2020 tavoitteen ylityksen epävarmuuden merkittävimmät aiheuttajat tilanteessa 1 ja 2. Kuvassa 12 on esitetty tilanteessa 1 ja 2 kustannusten nykyarvoon eniten vaikuttavat tekijät. Koska malli on dynaaminen, muuttujien vaikutus lopputulokseen on hieman erilainen eri vuosina. Tämän vuoksi kuvissa on esitetty punaisella vuotuisen vaihtelun määrä kullekin muuttujalle. Vaaleansinisellä palkilla on kuvattu muuttujan vuotuisten korrelaatiokertoimien pienin merkittävä arvo.

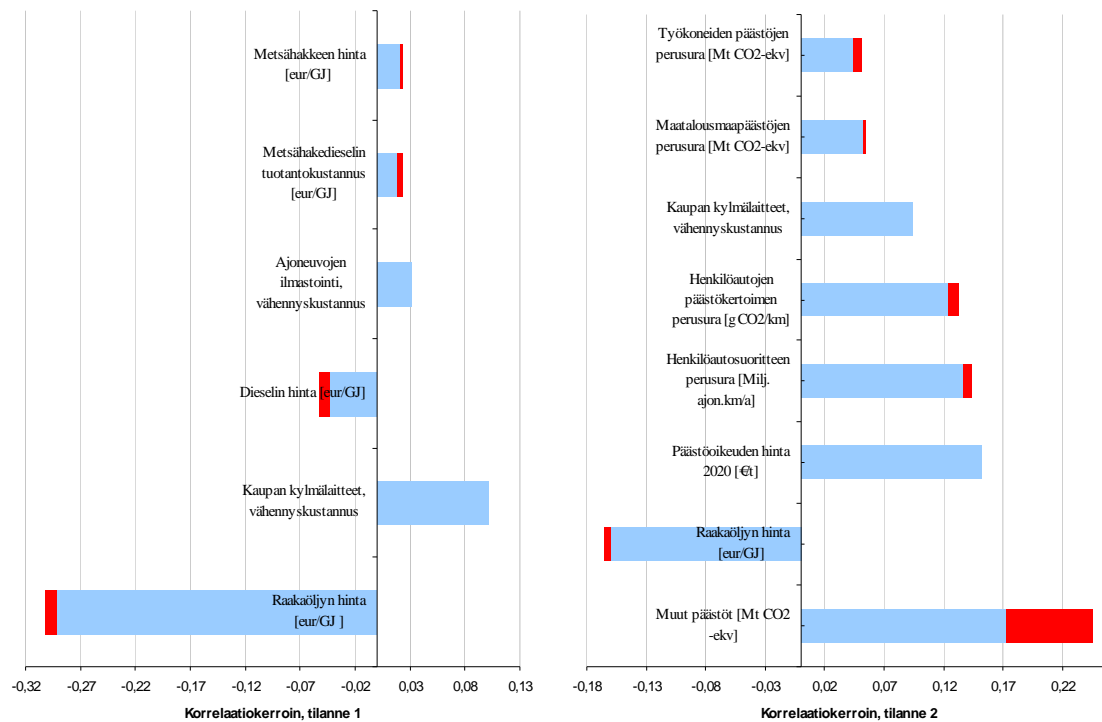
4. Tulokset



Kuva 11. Kansallisin vähennyskeinoin saavutettavan päästötavoitteen kumulatiivisen ylityksen epävarmuuteen eniten vaikuttavat tekijät, kun päästökiintiöllä ei voida käydä kauppaa (tilanne 1) ja kun päästökiintiöllä voidaan käydä kauppaa (tilanne 2). Muuttujan korrelaatiokerroimen arvo vaihtelee hieman vuosittain ja kuvassa punaisella on esitetty muuttujan vuotuisten vaihteluiden väli. Palkin pituus kuvaa tekijän suhteellista vaikutusta lopputuloksen epävarmuuteen.

Kuvasta 11 huomataan, että tavoitteen ylitykseen eniten vaikuttavat tekijät ja niiden vaikutusten voimakkuus ovat hyvin samankaltaisia. Molemmissa merkittävimpanä tekijänä on luokka muut päästöt, koska niiden osuus kokonaispäästöistä on melko suuri eikä mallissa toisaalta huomioida tämän luokan päästövähennyskeinoja. Lisäksi havaitaan, että liikennesektorille vaikuttavilla muuttujilla ”henkilöautosuoritteen perusura” ja ”henkilöautojen päästökertoimen perusura” on suuri korrelaatiokerroimen arvo, koska liikennesektorin päästöt ja mahdolliset päästövähennykset ovat suhteessa melko suuret verrattuna muiden sektoreiden päästöihin. Kuvasta 11 havaitaan myös, että kaikkien esitettyjen muuttujien muutokset vaikuttavat samansuuntaisesti lopputulokseen, koska päästöjen kasvaessa tavoitteen ylitys pienenee.

4. Tulokset



Kuva 12. Portfolion kokonaiskustannusten epävarmuuteen eniten vaikuttavat tekijät, kun päästökiintiöllä ei voida käydä kauppaa (tilanne 1) ja kun päästökiintiöllä voidaan käydä kauppaa (tilanne 2). Muuttujan korrelaatiokerroin vaihtelee hieman vuosittain ja kuvassa punaisella on esitetty muuttujan vuotuisten vaihteluiden väli. Palkin pituus kuvaa tekijän suhteellista vaikutusta lopputulosten epävarmuuteen.

Kuvasta 12 havaitaan, että eri optimiratkaisuissa eniten kustannusten nykyarvoon vaikuttavat muuttujat ovat erilaisia. Kustannukset muodostuvat pelkästään valittujen vähennyskeinojen toteuttamisesta tilanteessa 1. Tilanteessa 2 kustannuksiin vaikuttaa myös päästökiintiöllä käytävä kauppa. Eri ratkaisuihin valitaan toteutettavaksi erilaisia vähennyskeinoja, jolloin myös riippuvuuksien voimakkuudet muuttuvat. Tuloksista havaitaan kuitenkin, että molemmissa raakaöljyn hinnalla ja kokonaiskustannuksilla on vahva käänteinen riippuvuus, joten raakaöljyn hinnan noustessa päästövähennyskustannukset pienenevät. Lisäksi havaitaan, että molemmissa tilanteissa liikennesektorin kustannuksilla on vahva korrelaatio kokonaiskustannusten kanssa, koska näissä vähennyskeinoissa vähennyspotentiaalit ja sen vuoksi myös keinojen kokonaisvähennyskustannukset ovat melko suuria muihin keinoihin verrattuna. Tilanteessa, jossa päästöoikeuksia voidaan ostaa tai myydä, päästöoikeuden hinnalla on huomattavan vahva korrelaatio kokonaiskustannusten kanssa, koska päästökiintiön ostolla korvataan suuri määrä vähennystavoitteen alittavia päästöjä. Lisäksi päästökiintiön hinta vuonna 2020 on hyvin epävarma ja sitä kuvataan mallissa leveällä jakaumalla.

5. Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin, millaisin ja milloin aloitetuin keinoin Suomen päästökauppasektorin ulkopuolisille sektoreille asetettu päästötavoite voidaan saavuttaa. Tarkasteluun käytettiin stokastista optimointimallia, jonka avulla voitiin etsiä eri päästötasoilla kustannukset minimoivia portfolioita siten, että mallin muuttujien epävarmuuksien vaikutukset voitiin huomioida lopputuloksissa. Koska päästövähennyskeinoilla saavutettaviin päästövähennyksiin ja aiheutuviin kustannuksiin liittyy epävarmuutta, on työssä muodostetun stokastisen optimointimallin avulla tarkasteltu, kuinka suurina ovat riskit ylittää arvioidut kustannukset ja toisaalta olla saavuttamatta ennakoitua päästövähennystä. Tällöin erillisiin päästövähennyskeinojen kombinaatioihin eli portfolioihin liittyy erilainen todennäköisyys saavuttaa asetettu päästötavoite.

Tuloksista havaitaan, että päästötavoitteen saavuttaminen on hyvin epätodennäköistä, mikäli päästöt kehittyvät mallissa muodostetun perusuran mukaisesti eikä tarkasteltuja lisävähennystoimia aloiteta. Toisaalta vaikka päästövähennystoimia toteutetaan, sisältyy kaikkiiin tarkasteltuihin portfolioihin riski olla saavuttamatta tavoitetta tai toisaalta ylittää arvioidut kustannukset. Lisäksi huomataan, että suuremmilla tavoitteen saavuttamisen todennäköisyytasoilla tehtävät parannukset maksavat suhteellisesti enemmän kuin pienemmillä tavoitteen saavuttamisen todennäköisyytasoilla tehtävät parannukset, koska päästövähennysten rajakustannukset kasvavat vähennettyjen päästöjen määrän kasvaessa.

Työssä on tarkasteltu itsenäisten vähennyskeinojen toteuttamista kahdessa erillisessä tilanteessa, joista toisessa voidaan käydä jäsenmaiden välillä kauppaa päästökiintiöillä vuonna 2020 ja toisessa tämä ei ole mahdollista. Päästökiintiöillä käytävän kaupan avulla voidaan estää päästövähennysten rajakustannusten nouseminen päästökiintiön hintaa korkeammaksi. Toisaalta tällöin arvioitujen kustannusten ylittämiseen liittyvät riskit ovat mallissa suuremmat kuin tilanteessa, jossa tavoite pyritään saavuttamaan kokonaisuudessaan kansallisin vähennyskeinoin, koska päästökiintiön hinta on hyvin epävarma.

Tilanteessa, jossa päästökiintiöillä ei voida käydä kauppaa, odotusarvoisesti (50 %:n todennäköisyydellä) tavoitteen saavuttava optimiportfolio vastaisi nettonykyarvoltaan noin 860 M€ kustannustasoa välillä 2010–2020. Mikäli tavoitteen saavuttamistodennä-

köisyys halutaan nostaa esimerkiksi tasolle 68 %, vastaisi tämä odotusarvoisesti päästötavoitteen 5 Mt CO₂-ekv. kumulatiivista ylitystä, 990 milj. € kustannustasoa, ja noin 40 €/t marginaalikustannuksia.

Tehokkaiden portfolioiden kustannusten ja päästövähennysten vaihteluvälit ovat lähes yhtä suuret eri päästötasoilla. Toisaalta tällöin odotusarvoon verrattu suhteellinen epävarmuus pienenee, kun tavoitteen ylittämisen tai kustannusten odotusarvon tasoa nostetaan. Saavutettavien päästövähennysten ja kustannusten epävarmuutta ei voida merkittävästi pienentää portfolioita muuttamalla, vaikka kustannusten nousu sallittaisiin.

Mahdollisuus käydä kauppaa päästökauppiin muuttaa tehokkaissa portfolioissa esiintyviä vähennyskeinoja ja niiden aloitusajankohtia. Kun päästökauppiin ei voida käydä kauppaa, on päästötavoitteen mahdollisimman tarkka saavuttaminen kustannusten minimoinnin kannalta optimaalista, koska päästöjen vähentäminen enemmän kuin tavoite vaatisi aiheuttaa kustannuksia, joilla ei kuitenkaan saavuteta optimoinnin kannalta uusia etuja. Jos päästökauppiin voidaan käydä kauppaa, tavoitteen tarkan saavuttamisen sijaan ensisijaista on toteuttaa keinoja, joiden marginaaliset kustannukset ovat päästökauppiin arvioitua hintaa pienemmät. Päästökauppiin käytävän kaupan avulla voidaan siten joustaa tavoitteen täsmällisestä saavuttamisesta siten, että tavoitteesta jääminen voidaan korvata päästökauppiin ostolla ja toisaalta päästövähennykset, joita tehdään enemmän kuin tavoite vaatisi, voidaan myydä ja näin pienentää kokonaiskustannuksia. Tällöin mahdollisuus käydä ei-PKS-päästökauppaa vaikuttaa keinojen valintaan. Tämän lisäksi keinojen aloitusajankohta voi muuttua, koska nykyarvon kannalta myöhemmin aloitetut toimet ovat edullisempia käytetyn korkokannan vuoksi. Ei-PKS-päästökauppa siirtää tällöin erityisesti sellaisten keinojen, joihin liittyy suuria alkuinvestointeja, aloittamista myöhemmäksi verrattuna tilanteeseen, jossa ei-PKS-päästökauppaa ei voida käydä. Ei-PKS-päästökaupan tapauksessa tehtäviä investointeja voidaan siirtää myöhemmäksi, koska päästötavoitetta ei ole välttämätöntä saavuttaa kokonaisuudessaan kansallisin vähennyskeinoin.

Päästökauppatapauksessa kustannusoptimaalinen tilanne saavutettiin ostamalla päästöoikeuksia vuosina 2013–2020 yhteensä 11 Mt CO₂-ekv. Tällöin kokonaiskustannustaso olisi nykyarvoltaan 450 milj. € eli noin 48 % vähemmän verrattuna tilanteeseen, jossa päästökauppiin ei voida käydä lainkaan kauppaa. Tuloksia tulkittaessa on kuitenkin hyvä huomioda, että käytetyssä mallissa oletettiin kaupattavien päästöoikeuksien hinnaksi keskimäärin 54 €/t CO₂, vuonna 2020. Käytetyllä viiden prosentin korkokannalla vuoteen 2010 diskonttattuna tämä on merkittävästi korkeampi kuin esimerkiksi sertifioitujen päästövähennysten (CER) nykyinen markkinahinta (n. 12 €/tCO₂e maaliskuussa 2011). Mikäli mallissa olisi oletettu päästöoikeuksien hinnan nykyarvon olevan lähempänä vallitsevaa CER-yksiköiden hintatasoa, käsittäisi kustannusoptimaalinen vähennysstrategia myös suuremmat päästöyksiköiden ostot.

Toisaalta mallin päästökauppatapauksen voidaan tulkita sisältävän myös Suomen tekemät suorat CER-ostot. Koska CER:ien suora käyttöoikeus on rajattu vuosittain 4 %

5. Yhteenveto

tasolle vuoden 2005 päästöistä³, nämä olisivat kumulatiivisesti enintään noin 10,6 Mt-CO₂-ekv. välillä 2013–2020. Mallin optimiratkaisun sisältäessä tätä määrää hieman suuremmat päästöoikeuksien ostot, jotka tulisi siten tehdä jäsenmaiden välisen päästökaupan hintatasolla, ei tämä tulkinta muuta mallin antamaa optimaalisten päästöoikeuksien ostojen tasoa. Sen sijaan kokonaiskustannukset olisivat merkittävästi pienemmät ostettaessa CER-oikeuksia esim. oikeuksien hinnan nykytasolla kuin ostettaessa oikeuksia ainoastaan jäsenmaiden välisen kaupan kautta, jossa hinta on tehtyjen oletusten mukaan merkittävästi korkeampi.

Mallissa minimointi tehdään kustannusten nykyarvon perusteella. Koska kustannukset tällöin diskontataan, voi käytetyllä korkokannalla olla vaikutusta mallin tuloksiin. Kustannusten nykyarvon kannalta myöhemmin tehdyt investoinnit ovat aina edullisempia, mikäli niiden nimellisarvo on eri vuosina sama. Mallissa eri keinoihin liittyy erilaisia kustannuksia siten, että johonkin keinoon liittyy suuria alkuinvestointeja, mutta ei kustannuksia tämän jälkeen. Toisaalta mallissa tarkastellaan myös keinoja, joiden kustannukset aiheutuvat useina keinon toteuttamista seuraavina vuosina, kun esimerkiksi korvataan fossiilisen polttoaineen käyttöä uusiutuvilla polttoaineilla. Tällöin käytetyn korkokannan suuruudella voi olla vaikutusta siihen, missä järjestyksessä keinot, joissa on erilaisia kustannuksia, toteutetaan. Mitä suurempi korkokanta on, sitä epäedullisempia ovat keinot, joihin liittyy suuria alkuinvestointeja, kustannusten nykyarvon kannalta. Käytetyllä korkokannalla voi olla tällöin vaikutus mallilla saataviin tuloksiin ja jatkotutkimuksissa tulosten herkkyyden tutkiminen käytetyn korkokannan suhteen olisi hyödyllistä.

Mallissa päästökaupan hinta on arvioitu hyvin epävarmaksi, mikä näkyy siten suurena kokonaiskustannuksiin liittyvänä epävarmuutena. Hinnan epävarmuus ei kuitenkaan vaikuta optimoinnilla saataviin tuloksiin, koska mallissa kustannusten minimointi suoritetaan odotusarvojen perusteella. Tällöin päästökaupan hinnan odotusarvolla on vaikutus toteutettavien keinojen ja niiden ajoituksen valintaan. Optimoinnissa toteutettavaksi valitaan keinoja, jotka ovat kustannustehokkuuden kannalta parhaita muihin keinoihin verrattuna. Tällöin päästökaupan hinnan odotusarvon pieneneminen luultavasti lisää ostettujen kiintiöiden määrää ja laskisi kokonaiskustannuksia, koska tällöin matalampi päästökaupan hinta määräisi optimoinnissa toteutettavien keinojen marginaalisten kustannusten ylärajan.

Herkkyydestarkastelussa havaittiin, että kustannuksiin vaikuttaa merkittävästi eri polttoaineiden hintakehitys. Mallissa polttoaineiden hinnat oletetaan riippumattomiksi raakaöljyn ja dieselin hintaa lukuun ottamatta. Riippuvuuksia voi kuitenkin esiintyä esimerkiksi öljyn ja liikennesuorituksen välillä siten, että öljyn hinnan nousu pienentää liikenne-

³ Sisältäen 1 %-yksikön verran CER-oikeuksia vähiten kehittyneistä maista.

suoritetta. Myös öljyn ja maakaasun sekä öljyn ja päästökaupan hintojen välillä voi esiintyä samansuuntaisia riippuvuuksia. Mikäli riippuvuudet olisi huomioitu mallissa, voisi tällä olla jonkin verran vaikutusta korreloivia muuttujia sisältävien keinojen kustannustehokkuuteen. Korrelaation huomioimisen vaikutukset arvioitiin kuitenkin pieniksi, eivätkä ne siten vaikuttaisi merkittävästi keinojen valintaan tai optimaalisten portfolioiden odotusarvoihin. Portfolioiden, jotka sisältävät samansuuntaisesti vaihtelevia, keskenään korreloivia muuttujia, riskit voisivat tällöin kuitenkin kasvaa. Muuttujien korreloinnin huomioinnilla olisikin siten luultavasti eniten vaikutusta portfolioiden epävarmuuksiin siten, että erisuuntaiset korrelaatiot pienentävät epävarmuutta, mutta samansuuntaiset korrelaatiot lisäävät sitä.

Taulukosta 5 ja kuvasta 9 voidaan päätellä, että jos voidaan varmistua esimerkiksi muiden jäsenmaiden kanssa tehtävillä sopimuksilla mahdollisuudesta käydä päästökauppiin kauppaa kaikkina vuosina 2013–2020, voidaan kustannusten odotusarvoa pienentää huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa vähennykset toteutetaan kansallisin toimin tai päästöoikeuksia ostetaan vasta tarkastelujakson lopussa. Jos päästökaupan hinta voitaisiin sopimuksen perusteella määrätä ennalta, pienensivät myös portfolion kustannuksiin liittyvät epävarmuudet siten, että portfolion epävarmuus aiheutuisi ainoastaan vähennyskeinojen kustannusten epävarmuudesta. Toisaalta jos ostettavien päästökauppioiden määrään sisältyisi epävarmuutta, tavoitteen saavuttamiseen liittyvä riski muuttuisi. Mahdollisilla sopimuksin varmistettavilla päästökauppioiden oston mahdollisuuksilla olisi siten arvoa kustannusten odotusarvon kannalta. Tällöin tulisi kuitenkin myös kuvata tarkemmin epävarmuuksineen vuotuiset hinnat ja määrät, joilla päästökauppiota sopimusten mukaan voitaisiin ostaa eri vuosina. Tällä lähestymistavalla jatkotutkimuksissa voitaisiin tarkastella, miten päästökauppaan liittyviltä riskeiltä voitaisiin paremmin suojautua.

Mallissa tarkastellaan ainoastaan aikaväliä 2010–2020. Kun työssä tarkasteltavien keinojen joukkoon kuuluu toimia, joilla saavutettaviin päästövähennyksiin liittyy viiveitä, voi tarkastelun rajauksen vuoksi tällaisten keinojen valinta tapahtua harvemmin kuin jos tarkasteltaisiin pitempää aikaväliä. Pitempää aikaväliä tarkastelemalla voitaisiin varautua myös mahdollisiin, vuoden 2020 jälkeisiin päästötavoitteisiin. Tällöin optimoinnissa voisivat tulla useammin valituiksi keinot, joilla saavutettaviin päästövähennyksiin liittyy pitkiä viiveitä ja joilla voitaisiin luoda edellytykset myös vuoden 2020 jälkeisiin päästövähennyksiin.

EU on tarjoutunut korottamaan 2020 päästövähennystavoitettaan -30 % tasolle vuoden 1990 päästöistä, mikäli kattava kansainvälinen päästörajoitussopimus saadaan solmittua. Tällöin myös Suomen ei-PK-sektorin päästövähennystavoite oletettavasti muuttuisi. Mikäli uusi tavoite asetettaisiin EU:n komission aiemman ehdotuksen mukaisesti, olisi Suomen uusi tavoite vuodelle noin -23 % vuodesta 2005, arviolta 25,3 Mt CO₂-ekv (Ekholm 2010a). Tässä tutkimuksessa tehtyjä laskelmia voidaan käyttää myös tämän korkeamman vähennystavoitteen vaikutusten arviointiin ei-

5. Yhteenveto

päästökauppatapauksessa, sillä korkeampi päästötavoite vastaisi kumulatiivisesti 9 Mt CO₂-ekv. vähennystä mallissa käytetystä perusurasta, ts. nykyisen tavoitteen ylittämistä odotusarvoisesti 9 Mt CO₂-ekv. kumulatiivisella päästö määrällä. Mikäli päästökauppaa ei ole mahdollista hyödyntää, kuvan 4 perusteella tästä seuraisi noin 400 milj. €kustannuksia. Marginaalikustannukset olisivat kuvan 6 perusteella tällöin noin 130 €/t, mikä on huomattavasti enemmän kuin esim. aiemmin TIMES-mallilla tehty arvio 82 €/t (Ekholm 2010a). Päästökauppatapauksen analysointi korkeammalla päästövähennystavoitteella ei kuitenkaan ole suoraan tämän työn tulosten perusteella mahdollista. Korkeampi EU-tasoinen päästötavoite nostaisi päästöoikeuksien hintaa jäsenmaiden välisessä kaupassa, mikä vaikuttaisi myös Suomen optimaaliseen vähennysstrategiaan päästökauppatapauksessa. Tässä työssä käytetty lähestymistapa olisi kuitenkin suoraan sovellettavissa myös tämän tapauksen analysointiin myöhemmissä tutkimuksissa.

Lähdeluettelo

- AKE. Henkilöautojen CO₂-päästöt vähentyneet: <http://www.ake.fi/ake/index.aspx?id=214> (viitattu 7.1.2011).
- Alaja, T. 2009. Emission abatement options and cost effect for fluorinated greenhouse gases – Emission projections for fluorinated greenhouse gases up to 2050, Finnish Environment Institute (SYKE), 7.12.2009.
- Bernard, A. & Vielle, M. 2009. Assessment of European Union transition scenarios with a special focus on the issue of carbon leakage. *Energy Economics* 31. S. 274–284.
- Böhringer, C., Löschel A., Moslener, U. & Rutherford, T. 2009. EU climate policy up to 2020: An economic impact assessment. *Energy Economics* 31. S. 295–305.
- Direktiivi 2009/29/EC direktiivin 2003/87/EY muuttamisesta kasvihuonekaasujen päästöoikeuksien kauppaa koskevan yhteisön järjestelmän parantamiseksi ja laajentamiseksi. Euroopan unionin virallinen lehti 140/63, 5.6.2009.
- Päätös 406/2009/EC jäsenvaltioiden pyrkimyksistä vähentää kasvihuonekaasupäästöjään yhteisön kasvihuonekaasupäästöjen vähentämissitoumusten täyttämiseksi vuoteen 2020 mennessä. Euroopan unionin virallinen lehti 140/136, 5.6.2009.
- EIA, 2010. Annual Energy Outlook 2010 With Projections to 2035. Energy Information Administration.
- Ekholm, T. 2010a. Achieving cost efficiency with the 30% greenhouse gas emission reduction target of the EU. VTT Working Papers 149.
- Ekholm, T. 2010b. Päästökauppaan kuulumattomien sektoreiden päästövähennykset ja niiden kustannustehokkuus. VTT tutkimusraportti VTT-R-02783-10.
- Energiamarkkinavirasto. Maakaasun kokonaishinnan kehitys 4/2010 saakka: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=1877&pgid=188&languageid=246> (viitattu 7.1.2011).
- EU:n energia- ja ilmastopaketti: http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/package_en.htm (viitattu 7.1.2011).
- European Commission. Document no. SEC(2010) 650, Part II.
- Forsström, J., Pursiheimo, E., Kekkonen, V. & Honkatukia, J. 2010. Ydinvoimahankkeiden periaatepäätökseen liittyvät energia- ja kansantaloudelliset selvitykset. VTT Working Papers 141.
- Hagström, M., Vartiainen, E. & Vanhanen, J. 2005. Biokaasun maatilatuotannon kannattavuus selvitys – Loppuraportti. Gaia Group Oy.

- Huhtinen, K., Lilja, R., Sokka, L., Salmenperä, H. & Runsten, S. 2007. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016. Suomen ympäristö, taustaraportti.
- LVM. 2009. Liikenne- ja viestintäministeriön hallinnonalan ilmastopoliittinen ohjelma 2009–2020. Ohjelmia ja strategioita 2/2009.
- McKeough, P. & Kurkela, E. 2008. Process evaluations and design studies in the UCG project 2004–2007. VTT Research Notes 2434.
- Monni, S., Pipatti, R., Lehtilä, A., Savolainen, I. & Syri, S. 2006. Global climate change mitigation scenarios for solid waste management. VTT Publications 603.
- Mäkelä, K., Laurikko, J. & Kanner, H. 2009. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt, LIISA 2008 laskentajärjestelmä. VTT tutkimusraportti VTT-R-08700-09.
- Pöyry. Puupolttoaineiden hintaseuranta: <http://www.puunhinta.fi/tilastot.htm?graph=fi-all-main> (viitattu 7.1.2011).
- TEM, 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf (viitattu 7.1.2011).
- Tilastokeskus. 2010. Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2008. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol, http://www.stat.fi/tup/khkinv/fin_nir_20100525.pdf (viitattu 7.1.2011).
- Toyota: http://www.toyota.fi/cars/new_cars/auris/auris_hinnat.aspx (viitattu 21.1.2011).
- Tuhkanen, S. 2002. Jätehuollon merkitys Suomen kasviuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. VTT tiedotteita 2142.
- Vapo Oy. 2006. Paikalliset polttoaineet – Suomen huoltovarmuuden perusta. Tietoa käytöstä, ominaisuuksista, luokituksista ja ympäristövaikutuksista. http://www.vapo.fi/filebank/2657-paikalliset_polttoaineet_esite06.pdf (viitattu 7.1.2011).
- TYKO. 2006. Työkoneiden päästömalli. VTT. <http://lipasto.vtt.fi/tyko/malli.htm>
- IEA. 2009. World Energy Outlook. International Energy Agency.
- YM. 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Ympäristöministeriön sektoriselvitys. Ympäristöministeriön raporteja 19/2008.
- Öljyalan keskusliitto: <http://www.oil-gas.fi/index.php?m=6&id=37> (viitattu 7.1.2011).

Liite A:

Taulukko 1. Mallin muuttujien jakaumat. Jakaumien minimi- ja maksimiarvot viittaavat jakauman 95 % luottamusväliin.

Muuttuja	Jakauma vuonna 2020				Jakauman kehityksen kuvaus
	Jakauma	Min	Mediaani	Max	
<u>Markkinahinnat [€/GJ]</u>					
Raakaöljyn hinta	Lognorm	5,0	13,2	35,2	Levenevä
Dieselin hinta	Lognorm	6,0	15,8	42,8	Levenevä
Sähkön systeemi-hinta	Lognorm	7,75	11,57	17,47	Levenevä
Puun hinta	Norm	2,792	3,472	4,152	Vakio
Metsähakkeen hinta	Norm	6,643	7,254	7,879	Kasvava ka
Maakaasun hinta	Norm	8,93	10,7411	12,60	Levenevä
<u>Investointikustannukset [M€]</u>					
Metaaniin talteenotto (jäte)	Tasa	35,93	47,77	59,61	Vakio
Metaanin oksidointi (jäte)	Tasa	160,2	197,8	235,4	Vakio
<u>Päästövähennyskustannukset [M€]</u>					
Kaatopaikkasijoituksen täyskielto	Tasa	1,2	25,0	48,7	Vakio
<u>Tuotantokustannukset [€/GJ]</u>					
Metsähakedieselin tuotantokustannus	Norm	7,47	9,29	11,12	Vakio
<u>Liikenteen perusrasuoritteet [Milj. ajon.km/a]</u>					
Henkilöautot	Lognorm	42140	52410	62680	Levenevä
Linja-autot	Norm	481,6	596,6	713,2	Levenevä
Pakettiautot	Norm	4208	5238	6242	Levenevä
Kuorma-autot	Lognorm	3025	3762	4513	Levenevä

Liite A:

<u>Liikenteen perusurapäästökertoimet</u> [g CO₂/km]					
Henkilöautot	Lognorm	135,2	168,0	201,0	Levenevä
Linja-autot	Norm	566	707	848	Levenevä
Pakettiautot	Norm	191,4	238,9	285,7	Levenevä
Kuorma-autot	Norm	619	773	925	Levenevä
<u>Perusurapäästöt</u> [Mt CO₂-ekv/a]					
Öljykattilat	Norm	1,343	2,212	3,081	Levenevä
F-kaasut	Norm	0,383	0,626	0,870	Levenevä
Märehtijät	Norm	1,080	1,340	1,598	Levenevä
Lannankäsittely	Norm	0,629	0,785	0,939	Levenevä
Maatalousmaat	Lognorm	2,693	3,351	4,015	Levenevä
Työkoneet	Lognorm	2,171	2,698	3,224	Levenevä
Muut päästöt	Norm	4,82	7,89	11,04	Levenevä
<u>Jätesektorin perusura</u>					
Kaatopaikoille päätyvä yhdyskuntajäte [kt]	Norm	268	440	616	Levenevä
Poltettava yhdyskuntajäte [kt]	Norm	396	652	906	Levenevä
Kompostoitava yhdyskuntajäte [kt]	Lognorm	251	420	588	Levenevä
Liete (kunnallinen) [Mt CO ₂ -ekv]	Norm	0,0017	0,0022	0,0026	Levenevä
Liete (teollisuus) [Mt CO ₂ -ekv]	Norm	0,039	0,048	0,058	Levenevä
Kiinteä teollisuusjäte [Mt CO ₂ -ekv]	Lognorm	0,22	0,27	0,33	Levenevä
Rakennusjäte [Mt CO ₂ -ekv]	Norm	0,12	0,15	0,18	Levenevä
Jätevesien käsittely [Mt CO ₂ -ekv]	Norm	0,16	0,18	0,20	Levenevä

<u>F-kaasujen vähennyskustannukset [€/t CO₂-ekv]</u>					
Kaupan kylmälaitteet	Norm	-23	19	60,9	Vakio
Rakennusten ilmastointi ja lämpöpumput	Norm	11,7	74	136,3	Vakio
Teollisuuden kylmälaitteet	Norm	23,6	46	68,3	Vakio
Ajoneuvojen ilmastointi	Norm	2,8	85	167,1	Vakio
<u>Päästökiintiön hinta vuonna 2020 [€/t]</u>	Norm	-4,8	54,0	112,8	Vain vuonna 2020

Taulukossa käytetyt lyhenteet:

Lognorm: Jakauma lognormaali

Norm: Normaalijakauma

Tasa: Tasajakauma

Levenevä: Jakauma on muodostettu satunnaiskulun avulla siten, että se on vuodesta 2010 eteenpäin tasaisesti levenevä vuoteen 2020 asti.

Vakio: Käytetty jakauma ja sen parametrit pysyvät kaikkina vuosina samoina.

Kasvava ka: Keskiarvo nousee välillä 2010–2020 lineaarisesti arvosta 5,1 arvoon 7,3. Hajonta sama.

Vain vuonna 2020: Muuttujaa käytetään mallissa vain vuonna 2020.

VTT Working Papers

- 152 Timo Laakso, Ian Baring-Gould, Michael Durstewitz, Robert Horbaty, Antoine Lacroix, Esa Peltola, Göran Ronsten, Lars Tallhaug & Tomas Wallenius. State-of-the-art of wind energy in cold climates. 2010. 69 p.
- 153 Teemu Tommila, Juhani Hirvonen & Antti Pakonen. 2010. Fuzzy ontologies for retrieval of industrial knowledge – a case study. 54 p. + app. 2 p.
- 154 Raili Alanen. Veneiden uudet energiajärjestelmät. 2010. 86 s.
- 155 Maija Ruska, Juha Kiviluoma & Göran Koreneff. Sähköautojen laajan käyttöönoton skenaarioita ja vaikutuksia sähköjärjestelmään. 2010. 46 s.
- 156 Jussi Lahtinen, Kim Björkman, Janne Valkonen, Juho Fritz & Ilkka Niemelä. Analysis of an emergency diesel generator control system by compositional model checking. MODSAFE 2010 work report. 2010. 35 p.
- 157 Tero Sundström, Ari Kevarinmäki, Stefania Fortino & Tomi Toratti. Shear resistance of glulam beams under varying humidity conditions. 2011. 125 p. + app. 12 p.
- 158 Hannes Toivanen. From ICT towards information society. Policy strategies and concepts for employing ICT for reducing poverty. 2011. 38 p. + app. 1 p.
- 161 Sebastian Teir, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Eemeli Tsupari, Janne Kärki, Antti Arasto & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Teknologiaakatsaus. 2011. 106 s. + liitt. 6 s.
- 162 Mikael Haag, Tapio Salonen, Pekka Siltanen, Juha Sääsä & Paula Järvinen. Työohjeiden laadintamenetelmiä kappaletavaratuotannossa. Loppuraportti. 2011. 40 s.
- 163 Marko Nokkala, Kaisa Finnilä, Jussi Rönty & Pekka Leviäkangas. Financial performance of Finnish technical networks. 2011. 56 p. + app. 90 p.
- 164 Jussi Rönty, Marko Nokkala & Kaisa Finnilä. Port ownership and governance models in Finland. Development needs & future challenges. 2011. 104 p.
- 165 Aira Hast, Tommi Ekholm & Ilkka Savolainen. Suomen kansallisten päästövähennystoimien epävarmuuksien ja riskien arviointi. 2011. 44 s. + liitt. 3 s.
- 166 Mustafa Hashmi. Survey of smart grids concepts worldwide. 2011. 74 p.
- 167 Aimo Tiilikainen, Kyösti Pennanen & Maarit Heikkinen. Tulevaisuuden elintarvikepakkaus. Kvantitatiivinen kuluttajatutkimus pakkausprototyyppien ja kaupallisten verrokkituotteiden eroista. 2011. 36 s. + liitt. 8 s.
- 168 Pekka Leviäkangas, Anu Tuominen, Riitta Molarius & Heta Kajo (Eds.). Extreme weather impacts on transport systems. 2011. 119 p. + app. 14 p.
- 169 Luigi Macchi, Elina Pietikäinen, Teemu Reiman, Jouko Heikkilä & Kaarin Ruuhilehto. Patient safety management. Available models and systems. 2011. 44 p. + app. 3 p.