

Nikita Semkin, Satu Lyyra, Maiju Kauko, Minna Tontti,
Noora Rantanen, Aura Nousiainen, Kaisa Kämäräinen
ja Jenni Patronen

Päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi

Valtioneuvoston
selvitys- ja tutkimus-
toiminnan julkaisusarja

2019:65

ISSN 2342-6799

ISBN PDF 978-952-287-802-1

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2019:65

Päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi

Nikita Semkin, Satu Lyyra, Maiju Kauko, Minna Tontti, Noora Rantanen,
Aura Nousiainen, Kaisa Kämäräinen ja Jenni Patronen

Valtioneuvoston kanslia

ISBN PDF: 978-952-287-802-1

Valtioneuvoston kanslia

Helsinki 2019

Kuvailulehti

Julkaisija	Valtioneuvoston kanslia	28.11.2019
Tekijät	Nikita Semkin, Satu Lyyra, Maiju Kauko, Minna Tontti, Noora Rantanen, Aura Nousiainen, Kaisa Kämäräinen ja Jenni Patronen	
Julkaisun nimi	Päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi	
Julkaisusarjan nimi ja numero	Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2019:65	
ISBN PDF	978-952-287-802-1	ISSN PDF 2342-6799
URN-osoite	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-802-1	
Sivumäärä	169	Kieli suomi
Asiasanat	Päästövähennys, kustannustehokkuus, laskentametodit, arviointi, taakanjakosektori, liikenne, rakennusten erillislämmitys, maatalous, tutkimus, tutkimustoiminta	
Tiivistelmä	<p>Hankkeen tarkoituksena oli tuottaa kokonaiskuva tällä hetkellä käytössä olevista menetelmistä päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arvioimiseksi taakanjakosektorilla. Työ perustui kirjallisuuskatsaukseen, työpajatyöskentelyyn ja asiantuntija-arvioihin. Hankkeessa on tarkasteltu Suomen lisäksi Isossa-Britanniassa, Ruotsissa ja Saksassa tehtyjä selvityksiä ja kustannustehokkuusarvioita. Raportissa käydään läpi tutkimuskysymykset, päästövähennystoimien kustannustehokkuusarvioinnin käsitteet ja arviointimenetelmät. Raportti esittelee myös sektorikohtaisia menetelmiä ja esimerkkilaskelmia liikenteen, rakennusten erillislämmityksen ja maatalouden osalta. Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta ja analysointi on hyvin monitahoinen ja poikkitieteellinen kokonaisuus, jossa vaaditaan kansantaloudellisten periaatteiden ymmärtämistä, mallinnusosaamista ja systeemiajattelua sekä yksityiskohtaista ymmärrystä eri sektorien lainalaisuuksista. Laskentametojeja on lukuisia ja käytetyt metodit vaihtelevat merkittävästi eri maiden, selvitysten ja sektorien välillä. Ylätasolla menetelmät voidaan jakaa top-down- (fokus kansantaloudellisissa kustannuksissa) ja bottom-up-menetelmiin (fokus teknologiakustannuksissa). Näiden päämenetelmien sisällä ja ohella on myös lukuisia muita menetelmiä ja menetelmäyhdistelmiä, joilla on kaikilla omat etunsa ja rajoitteensa. Suomen tulisi systematisoida päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi tarvittavien päästövähennystoimien ja ohjaukeinojen suunnittelua sekä seurata järjestelmällisesti toimilla saavutettuja hyötyjä ja toimien kustannustehokkuutta. Hyviä käytänteitä voitaisiin omaksua laaja-alaisemmin muista maista; Saksan keskeisissä selvityksissä laskentaoletukset avataan hyvin, Isossa-Britanniassa on keskitetty taho, jolla on monitahoinen rooli kustannustehokkuuslaskennassa ja sen kehittämisessä, ja Ruotsissa tehdään usein ex post -seurantaa laskennan oikeellisuudesta. Päästövähennysten kustannustehokkuusarvioinnin systemaattisuuden ja läpinäkyvyyden lisääminen edellyttää tiiviimpää yhteistyötä sekä ministeriöiden että kustannustehokkuuslaskelmia tekevien toimijoiden välillä. Yhteistyötä voidaan kehittää esimerkiksi tekemällä selvityksiä ministeriön ohjauksessa sekä jakamalla vastuuta toiminnan kehittämisessä ministeriöiden ja tutkimuslaitosten kesken.</p>	
Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.		
Kustantaja	Valtioneuvoston kanslia	
Julkaisun myynti/jakaja	Sähköinen versio: julkaisut.valtioneuvosto.fi Julkaisumyynti: vnjulkaisumyynti.fi	

Presentationsblad

Utgivare	Statsrådets kansli	28.11.2019
Författare	Nikita Semkin, Satu Lyyra, Maiju Kauko, Minna Tontti, Noora Rantanen, Aura Nousiainen, Kaisa Kämäräinen och Jenni Patronen	
Publikationens titel	Bedömning av kostnadseffektiviteten för åtgärder som minskar utsläpp	
Publikationsseriens namn och nummer	Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2019:65	
ISBN PDF	978-952-287-802-1	ISSN PDF 2342-6799
URN-adress	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-802-1	
Sidantal	169	Språk finska
Nyckelord	Utsläppsminskning, kostnadseffektivitet, beräkningsmetoder, upp-skattning, bördeförvaltningssektor, transport, separat uppvärmning av byggnader, jordbruk, forskning, forskningsverksamhet	
Referat	<p>Syftet med projektet var att ge en övergripande bild av de metoder som för närvarande används för att bedömma kostnadseffektiviteten för åtgärder som minskar utsläpp i bördeförvaltningssektorn. Arbetet baserar sig på en litteraturoversikt, ett studiegrupparbete och expertbedömningar. Förutom Finland har projektet granskat studier och kostnadseffektivitetsbedömningar som genomförts i Storbritannien, Sverige och Tyskland. Rapporten omfattar forskningsfrågor, begrepp om kostnadseffektivitetsbedömning av åtgärder som minskar utsläpp och olika utvärderingsmetoder. Rapporten introducerar också sektorspecifika metoder och exemplarberäkningar för transport, separat uppvärmning av byggnader och jordbruket. Kostnadseffektivitetsberäkning och analys av utsläppsminskningar är en komplex och tvärvetenskaplig enhet som kräver förståelse för ekonomiska principer, modelleringskompetens och systemtänkande samt en detaljerad förståelse av regelbundenhet i olika sektorer. Det finns talrika beräkningsmetoder och de metoder som används varierar mellan länder, undersökningar och sektorer. På hög nivå kan metoderna delas upp i top-down (fokus på nationalekonomiska kostnader) och bottom-up (fokus på teknologikostnader). Inom och utöver dessa huvudmetoder finns det många andra metoder och kombinationer av metoder som har sina egna fördelar och begränsningar. Finland bör systematisera planeringen av utsläppsminkningsåtgärder och kontroller som krävs för att uppnå landets utsläppsminskningmål. Också övervakningen av fördelarna och kostnadseffektiviteten hos åtgärderna bör vara mer systematisk. Goda sedvanor från andra länder kunde utnyttjas bättre; Tysklands viktigaste rapporter hämtas beräkningsantagandena väl fram, i Storbritannien finns det en centraliserad organisation, med en komplex roll som räknar kostnadseffektiviteten och utvecklar den och i Sverige eftergranskas uträkningens giltighet. Ökad systematisk och transparent utvärdering av kostnadseffektiviteten för utsläppsminskningar kräver ett närmare samarbete mellan ministerier och aktörer som deltar i kostnadseffektivitetsberäkningar. Samarbete kan utvecklas, t.ex. genom att genomföra studier under ledning av ministeriet och genom att dela ansvaret för utvecklingen av aktiviteter mellan ministerier och forskningsinstitut.</p>	
	Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokaytoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt	
Förläggare	Statsrådets kansli	
Beställningar/ distribution	Elektronisk version: julkaisut.valtioneuvosto.fi Beställningar: vnjulkaisumyynti.fi	

Description sheet

Published by	Prime Minister's Office	28.11.2019	
Authors	Nikita Semkin, Satu Lyyra, Maiju Kauko, Minna Tontti, Noora Rantanen, Aura Nousiainen, Kaisa Kämäräinen and Jenni Patronen		
Title of publication	Evaluation of the cost-effectiveness of emission reduction measures		
Series and publication number	Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2019:65		
ISBN PDF	978-952-287-802-1	ISSN PDF	2342-6799
Website address URN	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-802-1		
Pages	169	Language	Finnish
Keywords	Emission reduction, cost efficiency, calculation methods, effort sharing sector, transport, building specific heating, agriculture, research, research activities		
Abstract	<p>The purpose of the project is to provide an overview of the methods currently used to evaluate the cost-effectiveness of emission reduction measures in the effort sharing sector. The work is based on a literature review, workshops and expert assessment. In addition to Finland, the project has examined studies and cost-effectiveness assessments carried out in Great Britain, Sweden and Germany. The report discusses research questions, the concepts of cost-effectiveness assessment of emission reduction measures and evaluation methods. The report also presents sector specific methods and sample calculations for transport, building specific heating and agriculture. Calculating and analyzing cost-effectiveness of emission reductions is a complex and interdisciplinary task that requires an understanding of economic principles, modeling skills and systematic thinking as well as understanding of the detailed characteristics of different sectors. There are several different calculation methods and the methods used vary considerably between countries, surveys and sectors. On a high level, there are two main approaches: top-down (focus on national economy costs) and bottom-up (focus on technology costs). Within and beyond these approaches, there are numerous other methods and combinations of methods, each with its own advantages and limitations. The study finds that Finland should systematize the planning of emission reduction and control measures. Finland should also systematically monitor the results and cost-effectiveness of emission reduction measures. Good practices from other countries could be more widely adopted in Finland. For example, in Germany, central reports explain the calculation assumptions transparently; in the UK, the Committee on Climate Change has a multifaceted role in the cost effectiveness assessment and development of the evaluation methodology; in Sweden, the accuracy of calculations is often assessed ex-post. In Finland, increasing the systematic and transparent assessment of the cost-effectiveness of emission reductions requires closer cooperation between ministries and those involved in the cost-effectiveness calculations. Cooperation can be further developed in numerous ways. For example, ministries can set clear guidelines for analysis and institutions and ministries can share responsibility for the development of activities.</p>		
	<p>This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.</p>		
Publisher	Prime Minister's Office		
Publication sales/ Distributed by	Online version: julkaisut.valtionneuvosto.fi Publication sales: vnjulkaisumyynti.fi		

Sisältö

1	Tiivistelmä	10
2	Johdanto	13
3	Tutkimuskysymykset ja menetelmäkuvaus	16
3.1	Tutkimuskysymykset	16
3.2	Projektin vaiheet ja menetelmät	16
4	Päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arvioinnin käsitteet	18
4.1	Kustannustehokkuuslaskennan terminologia	18
4.2	Raportin käsitteet ja määritelmät	19
5	Kustannustehokkuuden arviointi Suomessa	21
5.1	Taustaa päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arvioinnille Suomessa	21
5.2	Kustannusvaikutusten arviointi keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelmassa	24
5.3	Kustannustehokkuuden arviointimenetelmät taakanjakosektorilla	26
5.3.1	SONETS -mallin kuvaus (stokastinen optimointimalli).....	28
5.3.2	Uusiutuvan energian politiikkatoimien vaikuttavuusarviointit IMPAKTI-hankkeessa.....	31
5.3.3	Sitran kestävää verouudistusta koskevan raportin kustannus- ja päästövähennysarviot.....	35
5.3.4	Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi	36
5.3.5	Maataloussektorin päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi	38

5.3.6	Jätehuollon päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi	40
5.4	Yhteenveto kustannustehokkuuden arvioinnista Suomessa	41
6	Menetelmät kustannustehokkuuden arviointiin	43
6.1	Kustannustehokkuuslaskennan elementit ja kysymykset	43
6.1.1	Toimenpidearvioinnin tavoite	46
6.1.2	Tarkastelujakson valinta	46
6.1.3	Perusuran valinta	47
6.1.4	Skenaariot	51
6.1.5	Mallinnusmenetelmät	53
6.1.6	Kustannusnäkökulma	54
6.1.7	Kustannustehokkuuden määrittäminen	56
6.1.8	Muiden hyötyjen tarkastelu	62
6.2	Viitekehykset kustannustehokkuuden arviointiin	62
7	Kustannustehokkuusarviointi eri sektoreilla ja esimerkkilaskelmat	65
7.1	Liikennesektori	65
7.1.1	Liikennesektori päästövähennysten laskentanäkökulmasta	65
7.1.2	Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta liikennesektorilla	67
7.1.3	Yhteenveto analyysimenetelmistä	78
7.1.4	Esimerkkilaskenta liikennesektorilla	84
7.2	Rakennusten erillislämmitys	87
7.2.1	Rakennusten erillislämmityssektori päästövähennysten laskentanäkökulmasta	87
7.2.2	Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta rakennusten erillislämmityssektorilla	89
7.2.3	Iso-Britannia, CCC (2015)	91
7.2.4	Yhteenveto analyysimenetelmistä	92
7.2.5	Esimerkkilaskenta rakennussektorilta	101
7.3	Maatalous	107
7.3.1	Maataloussektori päästövähennysten laskentanäkökulmasta	107
7.3.2	Päästövähennysten kustannustehokkuuden laskenta maataloussektorilla	110
7.3.3	Yhteenveto analyysimenetelmistä	123
7.3.4	Esimerkkilaskenta maataloussektorilta	125

8	Johtopäätökset	134
8.1	Päästövähennystoimien kustannustehokkuuslaskennan analysointi	134
8.2	Hyviä käytäntöjä muista maista.....	136
8.3	Kehityskohteet.....	138
	Liite 1: Yhteenvedot työpajoista	141
	Liite 2: Ilmastopoliitiikan ja kasvihuonekaasupäästöjen laskennan viitekehykset	145
	Liite 3: Liikennesektorin esimerkkilaskelma	149
	Liite 4: Rakennusten erillislämmityssektorin esimerkkilaskelma	151
	Liite 5: Maataloussektorin esimerkkilaskelma	153
	Lähteet	156

Pöyry Management Consulting haluaa kiittää kaikkia raportin tekoon, työpajoihin ja kommentointiin osallistuneita tahoja. Erityiskiitos raportin tekoon ja työpajavalmisteluun aktiivisesti osallistuneille alikonsulteillemme Sari Siitoselle, Kaisa Riikolle ja Pentti Meriläiselle. Kiitos myös hankkeen ohjausryhmälle rakentavasta palautteesta ja sisältöihin liittyvistä keskusteluista. Saara Tamminen Sitrasta ja Heikki Lehtonen Luonnonvarakeskuksesta ovat myös antaneet arvokkaita kommentteja raportin sisältöön ulkoisten asiantuntijoiden roolissaan.

Marraskuu 2019

1 Tiivistelmä

Tämän hankkeen tarkoituksena on tuottaa kokonaiskuva tällä hetkellä käytössä olevista menetelmistä päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arvioimiseksi. Hanke keskittyy erityisesti taakanjakosektorin päästövähennystoimien kustannustehokkuuteen. Hankkeessa on tarkasteltu Suomen lisäksi erityisesti Isossa-Britanniassa, Ruotsissa ja Saksassa tehtyjä selvityksiä ja kustannustehokkuusarvioiteja. Työn tavoitteena on ollut vastata etenkin seuraaviin kysymyksiin:

- Miten päästövähennystoimien kustannustehokkuutta on Suomessa eri sektoreilla arvioitu?
- Millaisia menetelmiä ja käsitteitä päästövähennystoimien kustannustehokkuuden määrittelyyn käytetään ja miten näitä voitaisiin selkeyttää? Millaisia käytäntöjä on muissa EU-maissa, esimerkkeinä Saksa, Iso-Britannia, Ruotsi?
- Miten erilaisten toimien kustannukset kohdistuvat eri toimijoille? Miten eri sektoreiden päästövähennystoimien kustannuksia voidaan vertailla keskenään? Miten väletetty päästömäärä tulisi laskea?

Työ on jakautunut kolmeen vaiheeseen, ja se perustuu kirjallisuuskatsaukseen, työpajatyöskentelyyn ja asiantuntija-arvioihin. Ensimmäisessä vaiheessa kirjallisuuskatsauksen perusteella muodostettiin kokonaiskuva tällä hetkellä käytössä olevista menetelmistä, nostettiin esiin hyviä käytänteitä sekä tuotettiin taustatietoa kustannustehokkuusanalyysien tekemiseen ja arviointiin. Toisessa vaiheessa järjestettiin kolme työpajaa, joissa pohdittiin päästövähennysten kustannustehokkuuden laskentamenetelmiä sekä niihin liittyviä oletuksia, vahvuuksia, heikkouksia ja epävarmuustekijöitä. Työpajan tarkoituksena oli myös keskustella muiden maiden esimerkeistä ja niiden hyödynnettävyydestä sekä luoda ymmärrystä toimien ja toimenpiteiden keskinäisistä riippuvuussuhteista ja niiden vaikutuksesta laskentaan. Työpajaosallistujat olivat pääsääntöisesti ministeriöistä ja tutkimusorganisaatioista. Vaiheessa kolme työstettiin suosituksia arvioinnin kehittämiseksi.

Päästövähennyksiä ja niistä aiheutuvia kustannuksia on tarkasteltu paljon, mutta kustannustehokkuutta on tutkittu vähemmän. Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta ja analysointi on hyvin poikkitieteellinen kokonaisuus. Siinä vaaditaan kansantaloudellisten periaatteiden ymmärtämistä, mallinnusosaamista ja systeemijätteleä sekä hyvin yksityiskohtaista ymmärrystä eri sektorien lainalaisuuksista. Joissain tapauksissa vaaditaan myös ymmärrystä biologisista prosesseista. Tämä tekee kokonaisuudesta monitahoisen ja monimutkaisen.

Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskentaan liittyy useita elementtejä, kuten perusrakentaminen, skenaarioiden valinta, mallinnusmenetelmät, kustannustarkastelun valinta ja tulosten esitystapa. Mallinnusmenetelmän valinta ohjaa vahvasti muita elementtejä. Itse mallinnusmenetelmät voidaan jakaa bottom-up- ja top-down-lähestymismalleihin. Bottom-up-menetelmät lähtevät teknologiatasolta kun taas top-down-lähestymistavoilla voidaan tarkastella laajempia kansantaloudellisia vaikutuksia. Yleisimpiä bottom-up-menetelmiä ovat yksittäistarkastelu, jossa analysoidaan yksittäisiä toimenpiteitä, ja osittaistasapainomallit, joissa mallinnetaan yksi tai useampi sektori laskemalla kustannustehokkaimmat teknologiat päästövähennystavoitteen saavuttamiseksi.

Tarkasteltujen selvitysten perusteella ei voida esittää yhtä oikeaa menetelmää päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arviointiin, ja kaikissa menetelmissä on tietty edut ja rajoitteet. Hyväksi havaittu menetelmä on ns. integroitu lähestymistapa, jossa käytetään sekä bottom-up- että top-down-menetelmiä. Tällöin esimerkiksi lasketaan ensin sektorikohtaisesti bottom-up-menetelmällä toimenpiteiden kustannustehokkuudet tai kustannustehokkaat skenaariot, jonka jälkeen arvioidaan niiden vaikutuksia kansantalouteen top-down-malleilla. Tämän kaltaiset lähestymistavat ovat tosin laskennallisesti raskaita, mistä johtuen ne eivät sovellu kaikkiin tilanteisiin.

Eri sektoreilla käytetään erilaisia tarkastelutapoja ja menetelmiä. Maataloussektorilla käytetään esimerkiksi yksinomaan yksittäistarkastelua analyysimenetelmänä, mikä johtuu siitä, että päästölaskenta on kyseisellä sektorilla monitahoista. Päästöt ja päästövähennykset johtuvat biologisista prosesseista, erilaisia tilanteita on lukuisia, eikä tietopohja ole samalla tasolla kuin monilla muilla sektoreilla. Liikennesektorilla käytäntönä on tehdä bottom-up-mallinnus osittaistasapainomallilla ja kansantaloudellisten vaikutusten arviointi erikseen yleisillä tasapainomalleilla, joilla mallinnetaan koko toimenpidepaketin vaikutukset. Tämä sisältää myös muut kuin liikennesektorin vaikutukset. Sektorikohtainen vertailu on haastavaa, koska sektorit ovat hyvin erilaisia, ja toimenpiteiden päästövähennysten kustannustehokkuutta lähestytään eri tavalla eri sektoreilla.

Työssä havaittiin, että tyypilliset kustannustehokkuusanalyysit ja laskennat eivät tavallisesti tähtää ohjauskeinojen suunnitteluun, vaan niillä arvioidaan toimenpiteiden tai teknologioiden vaikutusta. Näissä tapauksissa voidaan esimerkiksi analysoida, mikä on päästöjen kannalta kustannustehokkain ajoneuvoportfolio, mutta harvoin analysoidaan kuinka hyvin esim. investointituki edesauttaa päästövähennystavoitteisiin pääsyä.

Toinen selkeä havainto on avoimuuden puute kustannustehokkuuslaskennassa. Laskennassa täytyy tehdä huomattavia määriä erilaisia oletuksia, mutta tyypillisesti näitä

oletuksia avataan hyvin puutteellisesti, mikä sekä vaikeuttaa eri laskentojen lopputulosten vertailua että hidastaa laskennan kehittymistä.

Päästövähennysten kustannustehokkuusanalyyysien ja laskentojen tulisi olla nykyistä huomattavasti avoimempia käytettyjen laskentamenetelmien ja taustaoletusten osalta. Läpinäkyvyys mahdollistaa paremman vertailun eri tahojen selvitysten menetelmien välillä ja paremman ymmärryksen yksittäisten selvitysten lopputuloksista sekä siitä miten eri tekijät vaikuttavat kustannustehokkuusarvioon. Avoimuus mahdollistaa laajemman keskustelun ja analyysimenetelmien kehittämisen jo julkaistujen selvitysten pohjalta.

Suomen tulisi systematisoida päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi tarvittavien päästövähennystoimien ja ohjauskeinojen suunnittelua sekä seurata toimilla saavutettuja hyötyjä ja toimien kustannustehokkuutta. Jatkuva seuranta mahdollistaa tarvittavien korjausliikkeiden toteuttamisen ajoissa. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa on kehitetty pitkäjänteinen kausittaisiin hiilibudjetteihin perustuva järjestelmä, jollainen voisi edesauttaa myös Suomen hiilineutraaliustavoitteen saavuttamista. Myös Ruotsissa systemaattisesta ohjauskeinojen ex-ante ja ex-post -arviointista voitaisiin ottaa Suomessa mallia.

Päästövähennysten kustannustehokkuusarvioinnin systemaattisuuden lisääminen edellyttää tiiviimpää yhteistyötä sekä ministeriöiden välillä, että kustannustehokkuuslaskelmia tekevien toimijoiden välillä. Analyysien monimutkaisuus ja poikkitieteellisyys edellyttää useita eri näkökulmia, joiden esille tuominen onnistuu yhteistyötä kehittämällä. Yhteistyö ministeriöiden välillä voi tarkoittaa enemmän yhteistyössä tehtyjä ja ohjattuja selvityksiä sekä selkeämpää vastuunjakoja toiminnan kehittämisessä.

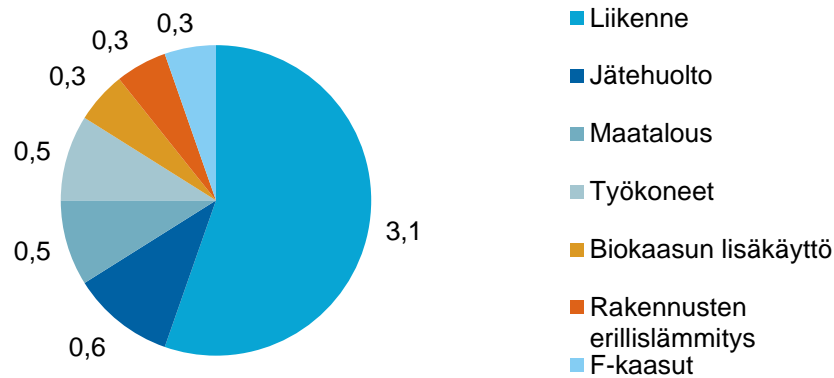
2 Johdanto

Suomen keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman (KAISU) toimeenpano alkoi vuonna 2018. Suunnitelmassa on tunnistettu kasvihuonekaasupäästöjen vähennyskohteita taakanjakosektorilla ja linjattu toimia vuodelle 2030 asetettujen päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi. Keskeisenä periaatteena on ollut valita toteuttamiskelpoisia toimia, jotka ovat kustannustehokkaita, ts. päästövähennystavoite saavutetaan mahdollisimman matalin kustannuksin.

Sekä nykyisten että suunniteltujen toimenpiteiden kustannustehokkuutta koskeva tietopohja on kuitenkin osittain puutteellinen ja arvioihin päästövähennystoimien kustannustehokkuudesta liittyy epävarmuutta. Aiheesta on tehty aikaisempaa tutkimusta ja karkeita arvioita toimenpiteiden kustannuksista on esitetty joidenkin sektoreiden ja päästövähennystoimien osalta. Mm. kansallisen energia- ja ilmastostrategian taustaselvityksessä on laskettu taakanjakosektorin päästövähennyskustannuksia ns. TIMES-VTT -mallilla. Myös Ilmastopaneeli on mm. kehittänyt menetelmäkehikon keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelmaan sisältyvien toimenpiteiden kustannustehokkuuden arvioimiseksi ja ehdottaa ns. sektorimallia, joka tuottaa kokonaiskustannus- ja rajakustannusfunktiot päästövähennysten suhteen. Edelleen tarvitaan kuitenkin tietopohjan vahvistamista ja toimien yhteismitallisen vertailun kehittämistä, jotta ilmastopolitiikan tavoitteiden saavuttaminen mahdollisimman kustannustehokkaasti voidaan varmistaa. Päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arviointiin liittyvä tietotarve koskee erityisesti päästökaupan ulkopuolista taakanjakosektoria, jolla ei ole tällä hetkellä yhtenäistä päästöjen hinnoittelumekanismia päästökaupan tavoin.

Vuoteen 2030 mennessä Suomen taakanjakosektorin tulisi vähentää päästöjään 39 % vuoden 2005 tasoon verraten. Skenaariolaskelmien perusteella metaanipäästöjen arvioidaan vähenevän 15 %, päästökaupan ulkopuolisten hiilidioksidipäästöjen 5 % ja typpioksiduulipäästöjen 2 %. Fluoratut kasvihuonekaasut, eli F-kaasut, vähenevät laskelmien mukaan eniten, 46 % vuoteen 2030 mennessä (TEM 2017). Päästövähennystavoitteen vaatimien arvioitujen lisätoimien päästövähennysvaikutus on 5,6 Mt CO₂e (Kuva 2-1) Energia- ja ilmastostrategian perusskenaarioon nähden. Taakanjakosektoriin kuuluvat liikenteen, maatalouden, rakennusten erillislämmityksen, työkooneiden, jätehuollon, F-kaasujen, muun polttoainekulutuksen ja pieneltä osin teollisuuden päästöt (Koljonen ym. 2017).

Kuva 2-1 Taakanjakosektorille arvioidut lisätoimien päästövähennysoimet (Mt CO₂e) vuoteen 2030 mennessä (Koljonen ym. 2017).



Näiden sektoreiden päästövähennysten lisäksi myös muista energiaperäisistä päästöistä on arvioitu saavutettavan päästövähennyksiä, samoin kuin poikkileikkaavista toimista, jotka vaikuttavat etenkin liikenteen, rakennusten erillislämmityksen ja maatalouden päästöihin.

Liikennesektori on merkittävin taakanjakosektorin päästöjen aiheuttaja; sen päästöt vuonna 2015 olivat yhteensä 11,1 Mt CO₂e. Liikennesektorin päästöjen osuus Suomen kokonaispäästöistä on noin viidesosa ja taakanjakosektorin päästöistä noin 40 %. Päästöistä 90 % on tieliikenteen aiheuttamia, josta 58 % on peräisin henkilöautoliikenteestä, 37 % paketti- ja kuorma-autoliikenteestä sekä 5 % linja-autoista, moottori- ja veneistä ynnä muista. Tulevaisuudessa tieliikennesuoritteiden oletetaan kasvavan, mutta autokannan uusiutuessa niiden ominaispäästöjen oletetaan pienenevän ja biopolttoaineiden käyttö lisääntyy. Tieliikenteen ohella muut liikennesektorin päästölähteet ovat rautatie, joka aiheuttaa 1 % päästöistä, lentoliikenne, joka aiheuttaa 2 % päästöistä sekä vesiliikenne, joka aiheuttaa 4 % päästöistä. Huomioitavaa on, että kansainvälisen meriliikenteen, lentoliikenteen tai rautatien sähköntuotannon päästöjä ei lasketa mukaan taakanjakopäästöjen seurantaan.

Rakennusten lämmityksen päästöt jakautuvat päästökaupparektorille ja taakanjakosektorille. Päästökaupparektorille lasketaan sähkön- ja kaukolämmöntuotannon päästöt. Taakanjakosektorilla rakennusten erillislämmityksen päästöt vuonna 2015 olivat 2,4 Mt CO₂e, mikä vastasi noin 7 % taakanjakosektorin päästöistä. Taakanjakosektorin merkittävin päästölähde on kiinteistökohtainen öljylämmitys, mikä vastaa 12 % kaikista rakennusten lämmityspäästöistä. Erillislämmityksen päästöistä suurin osa tulee asuinrakennusten lämmityksestä. Ympäristöministeriön (2017) julkaiseman päästöprojektin mukaan rakennusten erillislämmityksen päästöt pienenevät tasai-

sesti rakennuskannan uusiutumisen, korjausrakentamisen ja lämpöjärjestelmien muutoksen seurauksena. Toiseksi eniten päästöjä syntyy liike- ja julkisten rakennusten lämmityksestä. VTT:n laskemassa perusurassa oletetaan, että energiatehokkuusdirektiivi ja rakennusten parantuva energiatehokkuus vähentäisivät julkisten rakennusten ja liikerakennusten lämmitysenergian tarvetta. Päästöjen perusskenaarion mukaisesti päästöjen kokonaisvähennys on 1,2 Mt CO₂e. vuoden 2008 tasolta vuoteen 2030 mennessä. Prosentuaalisesti tämä tarkoittaa 39 %. (Ympäristöministeriö, 2017)

Maataloussektorin päästöt vuonna 2015 olivat yhteensä noin 6,5 Mt CO₂e. Suomen kokonaispäästöistä tämä on noin 10 %, ja taakanjakosektorin päästöistä noin 20 %. Vuonna 2015 viljelysmaan dityppioksidipäästöt aiheuttivat 53 % päästöistä, kotieläinten ruoansulatuksen metaanipäästöt 32 % päästöistä, lannankäsittelyn dityppioksidi- ja metaanipäästöt 11 % päästöistä, kalkituksesta sekä urealannoituksesta tulevat hiilidioksidipäästöt 3 % päästöistä. Pellon kulotuksen aiheuttamat päästöt Suomessa ovat marginaalisia.

Tässä raportissa arvioidaan erityisesti taakanjakosektorille keskittyvien päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arviointimenetelmiä. Arviointi on tehty sektorikohtaisesti sisältäen taustalaskennat, menetelmät, toimien kustannustehokkuuden arviointi, eri sektoreiden kustannusten vertailu ja kohdentuminen eri toimijoille. Suomen käytäntöjä on verrattu hyviin käytäntöihin valituissa kohdemaissa. Selvityksen tavoitteena on ollut antaa työkaluja kustannustehokkaiden päästövähennystoimien arviointiin. Kustannustehokkuuden tarkastelu edellyttää myös keskustelussa käytettävien käsitteiden selkeyttämistä, sillä käsitteiden epätarkkuus voi johtaa väärinymmärryksiin tai sekaannuksiin erilaisia menetelmiä ja selvitysten tuloksia hyödynnettäessä. Kustannus- ja päästövähennysarvioihin liittyy toisaalta aina paljon epävarmuutta. Kustannustehokkuuden mittaamisessa tarvitaan johdonmukaisuutta muun muassa siinä, mitä kustannuksia otetaan huomioon, miten eri tahoihin kohdistuvat kustannukset huomioidaan ja miten vältetty päästö lasketaan.

Tämän hankkeen tarkoituksena on tuottaa kokonaiskuva tällä hetkellä käytössä olevista menetelmistä, arvioida valittujen keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman toimenpiteiden kustannustehokkuutta ja tukea suunnitelman toimeenpanoa. Esi-merkkisektoreiksi on valittu maataloussektori, rakennusten erillislämmitys ja liikennesektori. Myös taakanjakosektorin toimenpiteiden vaikutukset muille sektoreille (päästökauppa ja LULUCF) on huomioitu kustannustehokkuuteen liittyvissä arvioissa.

3 Tutkimuskysymykset ja menetelmäkuvaus

3.1 Tutkimuskysymykset

Tässä työssä on pyritty vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten päästövähennystoimien kustannustehokkuutta on Suomessa eri sektoreilla arvioitu?
- Millaisia menetelmiä ja käsitteitä päästövähennystoimien kustannustehokkuuden määrittelyyn käytetään ja miten näitä voitaisiin selkeyttää? Millaisia käytäntöjä on muissa EU-maissa (esimerkiksi Saksa, Iso-Britannia, Ruotsi)?
- Miten ilmastopolitiikan päästövähennystoimien kustannustehokkuus voidaan määritellä ja miten sitä voidaan mitata? Miten erilaisten toimien kustannukset kohdistuvat eri toimijoille? Miten eri sektoreiden kustannuksia voidaan vertailla keskenään? Miten vältetty päästömäärä tulisi laskea? Millaisia hyviä käytäntöjä ilmastotoimien kustannustehokkuuden arvioimiseksi on käytössä muualla?

3.2 Projektin vaiheet ja menetelmät

Työ on jakautunut kolmeen vaiheeseen, ja se perustuu kirjallisuuskatsaukseen, työpaikatyöskentelyyn ja asiantuntija-arvioihin (Kuva 3-1).

Kuva 3-1 Projektin vaiheet



Kirjallisuuskatsauksen perusteella selvitettiin millä tavalla päästövähennysten kustannustehokkuuslaskentaa on tehty muualla maailmassa (Iso-Britannia, Saksa ja Ruotsi). Kirjallisuuskatsauksen keskeiset kysymykset on listattu alla olevaan taulukkoon (Taulukko 3-1).

Vaiheessa 2 pidettiin kolme työpajaa, yksi jokaista tarkasteltua sektoria kohden, eli maatalous, rakennusten erillislämmitys ja liikennesektori. Työpajoissa pohdittiin päästövähennysten kustannustehokkuuden laskentamenetelmiä sekä niihin liittyviä oletuksia, vahvuuksia, heikkouksia ja epävarmuustekijöitä. Työpajan tarkoituksena oli myös keskustella muiden maiden esimerkeistä ja niiden hyödynnettävyydestä sekä luoda ymmärrystä toimien ja toimenpiteiden keskinäisistä riippuvuussuhteista ja niiden vaikutuksesta laskentaan. Työpajaosallistujat olivat pääsääntöisesti ministeriöistä ja tutkimusorganisaatioista. Vaiheessa kolme työstettiin suosituksia arvioinnin kehittämiseksi.

Taulukko 3-1 Kirjallisuuskatsauksen keskeiset kysymykset

Toimenpidearvioinnin tavoite
<ul style="list-style-type: none"> • Onko arvioinnin tavoitteena vertailla toimenpiteiden kustannustehokkuutta, arvioida toimenpiteestä aiheutuvia kustannuksia vai suunnitella ohjauskeinoa?
<p>Tarkastelujakso</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vertaillaanko päästövähennyksiä nykytasoon, vai tiettyyn ajanhetkeen? • Mikä on tarkastelun ajanjakso – päästövähennyksiä esim. vuonna 2030 vai kumulatiiviset päästöt vuoteen 2030 mennessä?
<p>Perusura ja vaihtoehtoskenaariot</p> <ul style="list-style-type: none"> • Miten perusura on muodostettu? Mitä oletuksia tehdään teknologian kehityksen ja maailmantalouden suhteen? • Miten vastaskenaario, jolla arvioidaan päästövähennyksiä perusuraa vasten, on muodostettu?
<p>Laskenta- ja mallinnusmenetelmät</p> <ul style="list-style-type: none"> • Miten kustannustehokkuus on laskettu? • Mitä mallinnusmenetelmiä on käytetty? • Mitä ja miten eri ristikkäisvaikutuksia on huomioitu?
<p>Kustannusnäkökulma</p> <ul style="list-style-type: none"> • Millä tasolla kustannuksia arvioidaan? • Arvioidaanko kustannusten kohdentumista yksilöille tai valtiolle? • Millä korolla kustannuksia diskontataan?
<p>Tulosten esittäminen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Millä tavalla tulokset esitetään?
<p>Muiden hyötyjen tarkastelu</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tarkastellaanko muita hyötyjä, kuten pienhiukkasäättöjä tai laajempia kansantaloudellisia hyötyjä, kuten työllisyyttä?

4 Päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arvioinnin käsitteet

4.1 Kustannustehokkuuslaskennan terminologia

Päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arvioinnissa käytettävät käsitteet vaihtelevat voimakkaasti eri maissa ja jopa saman maan eri raporteissa. Kustannustehokkuudesta puhuttaessa kaikkein keskeisimmät käsitteet ovat kustannus ja päästö, joiden sisällössä voi huomata paljon eroja eri sektorien ja maiden välillä. Päästöllä esimerkiksi voidaan tarkoittaa kontekstista riippuen joko kaikkia kasvihuonekaasupäästöjä tai pelkästään hiilidioksidipäästöjä. Maataloussektorilla tarkastellaan tyypillisesti monia erilaisia kasvihuonekaasupäästöjä, kun taas rakennusten erillislämmityssektorilla hiilidioksidipäästöjen tarkastelun voidaan nähdä riittävänä lähestymistapana.

Käsitteissä on myös tiettyjä termejä, jotka menevät helposti sekaisin tai niistä voidaan puhua toistensa synonyymeina, vaikka termien sisällöt eivät olisi yhteneväisiä. Käsiteparit, jotka menevät tyypillisesti sekaisin ovat ohjauskeino ja toimenpide. Eri maiden välillä on myös eroa käsitteiden selittämisen ja avaamisen käytänteissä. Esimerkiksi sitä, mitä kustannuksella tarkoitetaan, avataan tyypillisesti melko vähän, vaikka vaihtoehtoja on monia. Tietyn maan selvityksissä voidaan myös suosia tiettyjä käsitteitä ja spesifiä terminologiaa, johtuen osittain tiettyjen mallinnustyyppien suosimisesta kyseisessä maassa. Maakohtaisia eroja mallinnustyypeissä on käsitelty tarkemmin myöhemmissä kappaleissa.

Yhtenäinen terminologia ja käsitteiden avaaminen toisi lisää läpinäkyvyyttä eri maiden selvitysten vertailuun ja voisi edesauttaa kustannustehokkuuslaskennan yhtenäistymistä pitkällä aikavälillä. Myös erilaiset ohjenuorat ja säännöt toisivat yhtenevyyttä käsitteistöön. Yhtenäisestä termien soveltamisesta ilmeisimpänä esimerkkinä toimivat katto-organisaatioiden tai esimerkiksi EU:n muodostamat käsitteet, kuten LU-LUCF.

4.2 Raportin käsitteet ja määritelmät

Seuraavassa taulukossa on esitetty tässä raportissa esiintyviä käsitteitä ja niiden määritelmiä.

Taulukko 4-1 Päästövähennystoimien kustannustehokkuusarvioinnin käsitteet

Käsite	Kuvaus
Hiilidioksidipäästöt	Hiilidioksidipäästö (CO ₂) on kasvihuonekaasupäästö, joka aiheuttaa ilmaston lämpenemistä. Valtaosa ihmiskunnan tuottamasta hiilidioksidista on peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä.
Hiilidioksidiekvivalentti (CO ₂ -ekv. /CO ₂ e)	Kasvihuonekaasujen yhteismitta. Sen avulla voidaan laskea eri kasvihuonekaasupäästöjen vaikutus kasvihuoneilmaston voimistumiseen. Yhteismitallistaminen tehdään lämmityspotentiaalikertoimen avulla.
Kasvihuonekaasupäästöt	Kasvihuonekaasupäästöt sisältävät hiilidioksidipäästöjen lisäksi muita kasvihuonekaasupäästöjä kuten metaania CH ₄ , dityppioksidia N ₂ O ja fluorattuja kasvihuonekaasuja (F-kaasut). Kuvataan usein yhteismitallistettuna hiilidioksidiekvivalenttipäästöinä (CO ₂ -ekv. / CO ₂ e). Kasvihuonekaasut aiheuttavat ilmaston lämpenemistä estämällä auringon lämpösäteilyn pääsyä ilmakehästä avaruuteen.
Kustannus	Tämän käsitteen käytössä on suurta vaihtelua, sillä kustannuksella voidaan tarkoittaa esimerkiksi yksittäisestä päästövähennystoimesta koituvia suoria tai epäsuoria kustannuksia yhteiskunnalle tai muille sektoreille, muuttuvia tai kiinteitä kustannuksia, brutto- tai nettokustannusta, investointikustannuksia, energiansäästökustannuksia ja niin edelleen. Eroja on myös siinä, miten hyödyt (negatiiviset kustannukset) huomioidaan.
Kustannuksen kohdistuminen	Kohdistumisella kuvataan tapaa, jolla päästövähennystoimenpiteen kustannukset jakautuvat eri toimijoiden kesken – mitä kustannuksia syntyy ja kenelle.
Kustannustehokkuus	Toimen aikaansaama päästövähennys jaettuna sen aiheuttamilla kustannuksilla. Esimerkiksi EUR/kg CO ₂ e.
Kustannus-hyötyanalyysi	Metodi yhteiskunnallisen kannattavuuden arviointiin analysoimalla suunnitellusta toimesta aiheutuvia euromääräisiä kustannuksia ja hyötyjä.
Marginaalipäästövähennyskustannus	Kustannus, jolla voidaan saavuttaa tietty yksikkömäärä päästövähennyksiä (EUR/CO ₂ e yleisimmin). Marginaalikustannus voi olla eri kuin koko toimenpiteen päästövähennyspotentiaalın saavuttamiseen vaadittava kustannus.
Ohjauskeino	Poliittinen ohjauskeino, joka ohjaa toimijoiden toimintaa haluttuun suuntaan, esimerkiksi verotuksen tai sääntelyn avulla.
Perusura / baseline	Oletus siitä, miten päästöt kehittyisivät ilman lisätoimia – vertailukohta päästövähennystoimien vaikutuksille.
Päästö	Päästö voi tarkoittaa joko hiilidioksidipäästöjä (CO ₂), kaikkia kasvihuonekaasupäästöjä (CO ₂ e) tai tiettyjä kasvihuonekaasupäästöjä.
Päästökerroin	Päästökerroin kuvaa laskennallista arvoa, jolla ilmaistaan hiilidioksidipäästöjen määrä tiettyä massaa kohden, esimerkiksi kgCO ₂ /kg tai kgCO ₂ /MWh. Vaihtoehtoisesti päästökerroin kuvaa kaikkia syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä yhteismitallistettuna massaksi hiilidioksidiekvivalenttia, esimerkiksi kgCO ₂ e/kg tai kg CO ₂ e/MWh.
Päästövähennys	Päästövähennys tarkoittaa saavutettua vältettyä päästöä toimenpiteen tietyn vuoden tai laitoksen eliniän ajalta.

Käsite	Kuvaus
Päästövähennyspotentiaali	Toimenpiteellä saavutettavissa oleva päästövähennyspotentiaali tarkasteluajanjakson aikana.
Päästövähennysprofiili	Eri toimenpiteiden päästövähennykset voivat ajoittua eri toimenpiteen elinajan ajankohtiin. Esim. metsityksestä ei saavuteta päästövähennyksiä heti toimenpiteen toteutettua, vaan vasta metsien kasvaessa tietyn ajan verran.
Ristikkäis- ja epäsuoratvaikutukset	Yleisnimitys erilaisille toimenpiteeseen tai sektoriin liittyvillä ei suorilla vaikutuksilla. Esim. toimenpiteellä voi olla ulkoisvaikutuksia muihin sektoreihin tai toimenpiteisiin, tai toimenpide itsessään riippuu toimenpiteen ulkopuolelta tulevista asioista. Luovat ”taustadynamiikan”, joka täytyy huomioida analyysissa.
Skenaario <ul style="list-style-type: none"> • Eksploratiivinen skenaario • Normatiivinen skenaario 	Toimintojen, päätöksenteon ja seurausten tapahtumaketju, joka johtaa nykytilasta tulevaisuudentilaan. Tutkiva skenaario, joka suuntautuu nykyhetkestä tulevaisuuteen. Kuvailee objektiivisesti erilaisia todennäköisiä tulevaisuuksia, joihin nykyhetken tilanteet, käytettävissä olevat resurssit ja ulkoiset edellytykset antavat mahdollisuuksia. Ennakoiva tai tavoitteellinen skenaario, joka perustuu erilaisiin tulevaisuudenkuviin.
Tarkastelujakso	Laskennan tai tarkastelun aikajakso. Laskennassa tarkoittaa aikaväliä, jonka aikana päästövähennystoteumaa ja kustannuksia arvioidaan.
Teknologia / menetelmä	Teknologia tai menetelmä jolla voidaan saavuttaa päästövähennyksiä. Esimerkiksi sähköautot tai erilaiset viljelymenetelmät.
Toimenpide	Toimenpide on konkreettinen työvaihe tai useiden toisiinsa liittyvien työvaiheiden kokonaisuus, joka tähtää jonkin ennalta määrätyn tavoitteen tai strategian saavuttamiseen. Voi viitata myös poliittiseen ohjauskeinoon. Samaa tavoitetta saatetaan edistää usealla samanaikaisella toimella eikä jokaisen yksittäisen toimenpiteen vaikutus ole aina eriteltävissä
Transaktiokustannus	Kustannukset, jotka liittyvät kaupantekoon, kuten esimerkiksi sopimuksen valmisteluun ja täytäntöönpanoon.

5 Kustannustehokkuuden arviointi Suomessa

5.1 Taustaa päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arvioinnille Suomessa

Suomen ilmastolaki (609/2015) määrittelee puitteet kansalliselle ilmastopolitiikan suunnittelulle ja sen toteuttamisen seurannalle. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia hyväksyttiin hallituksessa loppuvuodesta 2016. Sen tavoitteet ja linjaukset konkreettisista toimenpiteistä ovat tähdänneet silloisessa hallitusohjelmassa määriteltyihin energia- ja ilmastotavoitteisiin vuoteen 2030. Strategiaa täydensi taustaraportti, jossa analysoitiin linjausten vaikutuksia skenaarioihin ("with existing measures" ja "with additional measures") perustuen. Samaan aikaan valmisteltiin ilmastolakiin perustuen kansallista keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmaa (nk. KAISU). Raportti julkaistiin vuonna 2017 ja se sisälsi tarvittavat toimet taakanjakosektorin päästöjen vähentämiseksi vuoteen 2030.

Seuraavassa taulukossa on esitetty keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelman (KAISU) nyky- ja lisätoimenpiteet sektoreittain (Taulukko 5-1).

Taulukko 5-1 Suomen ilmastopolitiikan päästöjen vähentämisen nykytoimenpiteitä ja lisätoimenpiteitä taakanjakosektorilla; taulukko on muotoiltu KAISU-raportin perusteella (YM 2017)

Nykytoimenpiteet	Lisätoimenpiteet
Liikenne <ul style="list-style-type: none"> • Biopolttoaineiden jakeluvaikeus • Energiasisältövero/ hiilidioksidivero • Päästöjen mukaan porrastettu autoveroprosentti ja ajoneuvovero 	<ul style="list-style-type: none"> • Määräraha sähkö- ja biokaasuinfrastruktuurin edistämiseen sekä asuinrakennusten sähköisen liikenteen infrastruktuurin edistämiseen • Kehitetään pohjoismaihin yhteinen tavoitemittaristo • Määräraha täyssähköautojen hankintaa ja kaasu- tai etanolikonversion tekemistä varten • Määräraha romutuspalkkiokokeiluun • Autokauppiaille green deal -malli • Varmistetaan neuvontapalvelujen saatavuus ja vaikuttavuus sekä kannustetaan kuntia ottamaan käyttöön kannustimet hankinnoissa • Osallistetaan kaupunkiseutujen kehittämiseen mal-sopimusten kautta

Nykytoimenpiteet	Lisätoimenpiteet
	<ul style="list-style-type: none"> • Määräraha kaupunkiseutujen joukkoliikenteen digitalisaation kehittämiseksi ja liikenteen palveluistumisen edistämiseksi • Määräraha raideliikenteen osto- ja/tai velvoiteliikenteen lisäykseen • Ohjataan työpaikkoja ja palveluita keskuksiin ja joukkoliikenteen solmukohtiin • Edistetään täydennysrakentamista sekä yhdyskuntarakenteellisesti hyvien sijaintien luomista ja hyödyntämistä uudisrakentamisessa • Toteutetaan kävelyn ja pyöräilyn edistämishjelma vuosina 2018–2022 • Kehitetään pyörien liityntäpysäköintiä, asemanseutuja ja selvitetään ruuhkamaksujen käyttöönottoa • Vahvistetaan taloudellista ohjausta • Selvitetään työmatkakulujen verovähennysoikeuden päästöohjausvaikuttavuutta
Alueiden käyttö ja yhdyskuntarakenne	
<ul style="list-style-type: none"> • Valtakunnalliset alueiden käyttötavoitteet ja ns. mal-sopimukset 	
Maatalous	
<ul style="list-style-type: none"> • Manner-Suomen maaseudun-kehittämishjelman 2014–2020: ympäristönhoitonurmet ja vedenpinnan säätely (säättösalaajitus), maatalouden ja maaseudun yritysten investointituet ml. biokaasu 	<ul style="list-style-type: none"> • Viljellään eloperäisiä maita monivuotisesti muokkaamatta • Metsitetään/ kosteikkometsitetään eloperäisiä maita • Pohjaveden pinnan nosto säättösalaajituksella • Edistetään biokaasu tuotantoa • Edistetään maaperän hiilen lisäämistä ja säilyttämistä • Edistetään 4-promillen aloitteen toimeenpanoa • Vähennetään ruokahävikkiä ja noudatetaan ravitsemussuosituksia
Rakennusten erillislämmitys	
<ul style="list-style-type: none"> • Öljykattilakanta vähenee ja siirrytään lämpöpumppeihin (huom. F-kaasut), tai kaukolämpöön • Kiinteistöjen energiatehokkuustoimenpiteet • Lämmityspolttoaineiden jakelutoiminnan energiatehokkuussopimus 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 % bionesteen sekoitevelvoite • Valtionhallinto pois öljylämmityksestä ja muiden julkisen sektorin toimijoiden kannustaminen samaan • Uusiutuvan energian käyttö olemassa olevassa rakennuskannassa • Lämmityspolttoaineiden verotuksen nostaminen • Edistetään puhdasta puunpoltoa
Jätehuolto	
<ul style="list-style-type: none"> • Jätevero • Orgaanisen jätteen kaatopaikkakielto • Kaatopaikkakaasujen kerääminen ja käsittely 	<ul style="list-style-type: none"> • Jätteenpolton siirto päästökaupan piiriin • Kaatopaikka-asetuksen toimeenpanon seuranta
F-kaasut	
<ul style="list-style-type: none"> • F-kaasuja koskeva EU-asetus • MAC-direktiivi 	<ul style="list-style-type: none"> • Vältetään julkisen sektorin hankinnoissa F-kaasuja sisältäviä laitteita • Edistetään ja selvitetään vaihtoehtoisten teknologioiden käyttöönottoa
Työkoneet	
<ul style="list-style-type: none"> • Energiaverotus • Bensiinin biokomponentti • Työkoneiden tyyppihyväksyntää koskeva asetus 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 % bionesteen sekoitevelvoite • Edistetään biokaasun käyttöönottoa • Osallistutaan eu-tasolla työkoneiden co2 -säätelyyn • Nostetaan lämmityspolttoaineiden verotusta

Nykytoimenpiteet	Lisätoimenpiteet
	<ul style="list-style-type: none"> • Energiatehokkaiden ja vähäpäästöisten työkonoiden lisääminen julkisissa hankinnoissa • Edistetään energiatehokasta ja päästöjä vähentävää käyttöä informaatiota lisäämällä
Muu (polttoainekäyttö)	
<ul style="list-style-type: none"> • Puolustusvoimien energia- ja ilmastosuunnitelma • Energiaverotus 	<ul style="list-style-type: none"> • Edistetään polttoöljykattiloiden korvaamista kiinteään polttoaineen kattiloilla • Tehostetaan energiakatselmustoimintaa • Nostetaan lämmityspolttoaineiden verotusta

Ilmastolain nojalla on nimitetty asiantuntijaelin, Suomen ilmastopaneeli, joka analysoi keskipitkän aikavälin ilmasto-ohjelman laatimista varten edellytettäviä tietotarpeita ja määritteli ns. menetelmäkehikon (muistio ympäristöministeriölle tammikuussa 2016). Menetelmäkehikko sisältää periaatteet, joiden perusteella ilmastopoliittisten toimenpiteiden kustannustehokkuutta tulisi tarkastella, jotta on mahdollista laatia hyvä ilmasto-ohjelma. Muistion liitteenä on erikseen kuvattu kustannustehokkuustarkastelua ja esitetty havainnollistavia esimerkkilaskelmia tieliikenteen, maatalouden ja pientalojen erillislämmitystä koskien. (Ollikainen ym. 2016)

Ilmastopaneelin esittämän menetelmäkehikon keskeisin viesti on, että taakanjakosektorin ilmastotoimenpiteet tulee määrittää huomioiden kustannustehokkuus. Päästövähennystoimet tulee kohdistaa niin, että päästöjen vähentämisen rajakustannukset ovat kaikkialla yhtä suuret. Sen lisäksi tulee kuitenkin huomioida, että valitut toimet ovat yhteensopivat huomioiden pitkän aikavälin päästövähennystavoitteet vuoteen 2050 asti. Pitkän aikavälin päästöjen kehitystä on käsitelty PITKO (Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys) -hankkeessa, jonka loppuraportti julkaistiin helmikuussa 2019. Siinä skenaarioiden mallinnuksessa käytettiin TIMES-VTT -mallia ja Suomen kansantalouteen kohdistuvia vaikutuksia arvioitiin laskennallisen tasapainomallin (FINAGE) avulla. (Koljonen ym. 2019)

Ilmastopaneelin menetelmäkehikossa on käsitelty esimerkin mukaisen ilmasto-ohjelman toimenpiteet ja yhteiskunnalliset kokonaiskustannukset sekä niiden aiheuttamat yksityiset kustannukset. Yhteiskunnalliset kustannukset on suhteutettu vähennettäviin CO₂e-päästöihin. Esimerkeissä käsitellään myös sitä, kuinka reaaliset kustannukset, budjettivaikutukset ja yksityisille kuluttajille tulevat kustannukset erotellaan toisistaan. Ilmastopaneelin mukaan kokonaistaloudellisia vaikutuksia on mahdollista arvioida, kun varsinainen ilmastosuunnitelma on valmis. (Ollikainen ym. 2016)

Taulukko 5-2 Ilmastopaneelin näkemys ilmasto-ohjelman laatimisesta (mukailtu lähteestä Ollikainen ym. 2016)

Vaiheet	Periaate
1. Laaditaan päästöennusteet	Kullekin sektorille luodaan arvio päästöjen kehitysurasta (skenaario) ilman uusia politiikkatoimia. Skenaarioissa on huomioitava päästöjen kehittyminen jo nykytilanteessa.
2. Valitaan toimenpiteet sektoreittain	Sektoreittain esitetään valitut toimenpiteet ja päästövähennykset taloudellisessa edullisuusjärjestyksessä. Arvioidaan kustannukset kullekin toimenpiteelle ja kustannusten kohdistuminen.
3. Määritetään tarvittavat ohjaukeino	Kukin sektori arvioi, mikä ohjaukeino on tarpeen toimenpiteet toteuttamiseksi. Luodaan kannustimet ja tarpeen mukaan turvaututaan joko määrärajoitteisiin tai hintaohjaukseen verojen ja tukien muodossa. Hintaohjauksen osalta on tärkeä arvioida, kuinka toimijat reagoivat muuttuneessa tilanteessa.
4. Toimenpiteiden valinta	Toimenpiteet valitaan eri sektoreilta edullisuusjärjestyksessä, kunnes päästöjen vähentämistavoite saavutetaan. Huomioitava yhteensopivuus vuoden 2050 tavoitteiden kanssa.
5. Nettopäästötarkastelu	Arvioidaan sektoreittain erikseen riittävätkö toimenpiteet kokonaistavoitteen saavuttamiseksi, kun mahdolliset sektorien väliset päästövaikutukset on otettu huomioon.
6. Sosiaalisen hyväksyttävyyden arviointi	Arvioidaan ja tuetaan sosiaalisen hyväksyttävyyden kehittymistä. Selvityksiä voidaan laatia esim. kyselyin tai haastatteluin eri toimijoille.

Ilmastopaneelin mukaan ideaalitalanteessa kustannustehokkuus määritetään sektori-mallilla, joka tuottaa kokonaiskustannus- ja rajakustannusfunktiot päästövähennysten suhteen. Vaihtoehtoisesti toimenpiteet esitetään kustannusten osalta muodossa EUR/tonni vähennettyä CO₂-ekvivalenttipäästöä kohden. Kustannukset päästöjen vähentämisestä tulisi määrittää reaalkustannuksina eli ilman veroja tai tukia. Toimenpiteiden valintaperusteena ilmasto-ohjelmaan tulisi olla rajakustannusrasitus suhteessa muihin sektoreihin tai vaihtoehtoisesti EUR/tonni vähennettyä CO₂-ekvivalenttipäästöä. Erityistä huomiota laskelmissa tulee kiinnittää tilanteisiin, joissa päästövähennysten hyötyjä siirtyy muille päästökaupan ulkopuolisille sektoreille. Kokonaistaloudelliset vaikutukset on mahdollista arvioida vasta tämän jälkeen yleisellä tasapainomallilla. (Ollikainen ym. 2016)

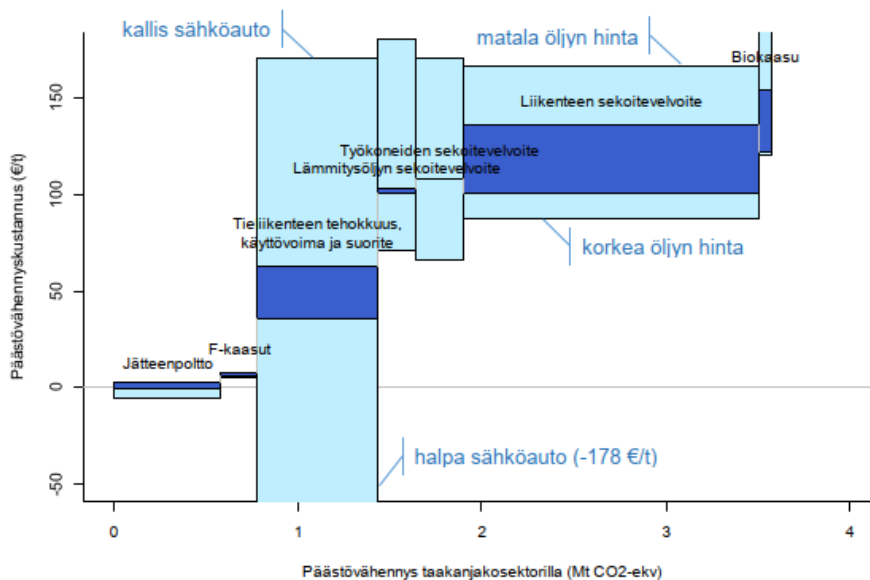
5.2 Kustannusvaikutusten arviointi keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelmassa

Keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelmasta on laadittu vaikutusarviot, joiden toteuttamisesta vastasi VTT (Koljonen ym. 2017). Kustannustehokkuutta arvioitiin vertaamalla

kustannustehokasta polkua nykytoimiin (TIMES-WEM) sekä perus- että herkkystarkastelutapauksissa ja laskennan optimoinnin lähtökohdaksi lisättiin taakanjakosektorin vuoden 2030 päästövähennystavoite. Herkkystarkastelut on tehty sekoitevelvoitteen käyttöönoton (lämmitysöljy ja työkoneiden dieselöljy) ja henkilöajoneuvojen liikennesuoritteiden kasvun osalta. Energia- ja ilmastostrategiassa linjatuilla WAM-toimilla taakanjakosektorin päästöt laskevat 21,2 Mt CO₂e:n tasolle noin 150 EUR/tCO₂e:n keskimääräisillä kustannuksilla. Määrä ei kuitenkaan riitä tavoitteen saavuttamiseksi, minkä vuoksi tarkasteltiin lisävähennyksiä (kustannusten optimointi). Kustannuksia optimoimalla voitaisiin mallinnuksen perusteella toteuttaa päästövähennyksiä edellä esitettyyn perusuraan verrattuna merkittävästi pienemmällä, keskimäärin 28 EUR/tCO₂e:n kustannuksilla. (Koljonen ym. 2017)

Energiajärjestelmä- ja talousmallinnuksen lisäksi vuoden 2017 vaikutusten arvioinnissa on hyödynnetty Suomen ympäristökeskuksen ENVIMAT-mallia (Suomen talouden materiaali-virtojen ympäristövaikutukset) ja FRES-mallia (ilmansaasteiden päästöjen ja niiden vaikutusten alueellinen päästöskenaariomalli). Seuraavassa kuvassa on havainnollistettu arvioituja kustannusvaikutuksia (kuva 5-1). Suunnitellut toimenpiteet eroavat kustannuksiltaan toisistaan huomattavasti, esimerkiksi sekoitevelvoitteet on päästövähennystoimina arvioitu kalliiksi. (Koljonen ym. 2017)

Kuva 5-1 Päästövähennys ja kustannukset taakanjakosektorilla KAISU-vaikutusarvioinnin mukaisesti (Koljonen ym. 2017)



Kuvassa siniset alueet kuvaavat arvioitua epävarmuutta: tumma alue liittyy toimenpiteiden ristikkäisvaikutuksiin ja vaalea alue herkkystarkasteluna tehtyihin tapauksiin.

KAISU-vaikutusarvioinnissa (Koljonen ym. 2017) on todettu, että kustannustehokkaat päästövähennykset eivät välttämättä toteudu pelkästään oletettujen taloudellisten kannustimien seurauksena, kuten TIMES-mallin optimoimissa kustannustehokkaissa skenaarioissa oletetaan. Todellisuudessa päätöksiä ei tehdä pelkästään kustannusperusteisesti. Suurin epävarmuus arvioinnissa liittyy liikenteen käyttövoiman muutoksiin, joihin vaikuttaa sekä öljyn hinta että sähköajoneuvojen hankintakustannukset. Kustannukset riippuvat hyvin paljon tehdyistä oletuksista. Mallinnuksella lasketut tapaukset antavat kuitenkin kustannuksille vertailukohtan. (Koljonen ym. 2017 ja Ekholm 2017)

5.3 Kustannustehokkuuden arviointimenetelmät taakanjakosektorilla

Suomessa taakanjakosektorin päästövähennystoimien kustannustehokkuutta on käsitelty useissa julkaisuissa, jotka liittyvät joko arvioituihin päästövähennyspolkuihin tai ilmastopoliittikan toimenpiteisiin. Raporteissa on käsitelty päästövähennyksiä ja niiden kustannuksia sekä yhdessä päästökaupan kanssa että erikseen koko taakanjakosektorilla, pääosin erilaisten skenaariotarkasteluiden ja mallinnusten avulla. Lisäksi kustannustehokkuuden arviointia (laskentaa) on kuvattu tarkemmin joidenkin sektoreiden osalta erillisissä raporteissa.

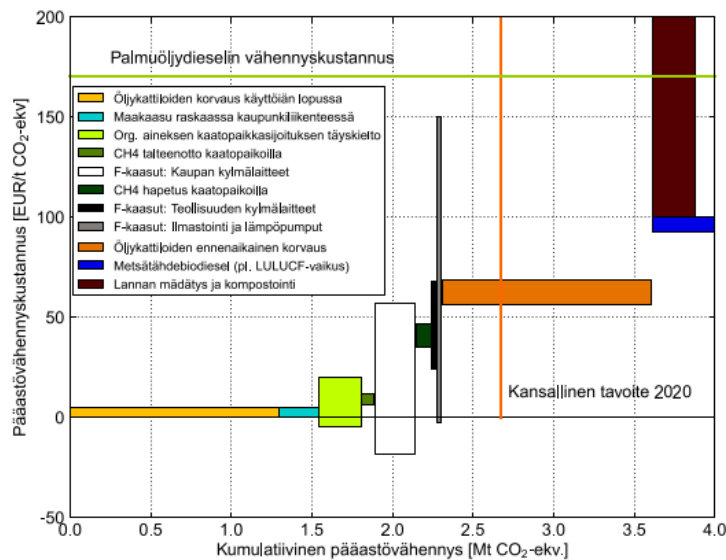
Taakanjakosektorin päästövähennystoimien kustannustehokkuutta on arvioitu kokonaisvaltaisesti VTT:n tutkimuksessa vuodelta 2010. Tutkimuksessa on kuvattu silloisen ilmasto- ja energiastrategian mukainen päästöjen perusura, päivitetty arvio päästöjen jakautumisesta eri sektoreille, tarkasteltu potentiaalisia päästöjen vähentämiskeinoja sekä esitetty arvio päästövähennysten marginaalikustannuskäyrästä. Tutkimus ei huomionnut mahdollisia vaikutuksia päästökauppasektorin tai LULUCF-sektorin välillä (esimerkiksi metsätähteen käytössä biodieselin valmistukseen ei huomioida vaikutusta LULUCF-sektorilla). VTT:n julkaisun perustella joidenkin päästövähennystoimien vähennyspotentiaali sekä kustannukset ovat olleet arvioiltaan hyvin epävarmoja. Lisäksi tutkimuksessa on voinut jäädä joitakin keinoja tunnistamatta keskeisillä sektoreilla, kuten maatalous ja liikenne. (Ekholm 2010)

Päästöjen tavoitearviot ovat perustuneet kansalliseen kasvihuonekaasupäästöinventaarioon sekä Tilastokeskuksen laskelmiin ei-päästökauppasektorin päästöistä. Kunkin sektorin päästövähennyskeinojen kustannuksiin liittyy suuria epävarmuuksia, ja raportissa todetaankin, että systemaattista tutkimusta päästövähennyskustannusten selvittämiseksi ei ole useassa tapauksessa tehty. Merkittäviä arviointiin vaikuttavia tekijöitä ja oletuksia ovat olleet erilaiset hintaprojektit (kuten öljy, sähkö, raakapalmuöljy,

metsähake), investointikustannukset, vähennyskeinojen tehokkuus sekä päästölähteiden kokonaisjakauma. Eri tekijöihin liittyviä epävarmuuksia ja niiden mahdollisia vaikutuksia kustannusarvioihin ei käsitelty. (Ekholm 2010)

Seuraavassa kuvassa on esitetty VTT:n selvityksessä (Ekholm 2010) arvioidut kumulatiiviset päästövähennykset ja marginaaliset vähennyskustannukset (kuva 5-2).

Kuva 5-2 Päästövähennyskeinojen kumulatiiviset päästövähennykset ja marginaaliset vähennyskustannukset (Ekholm 2010)



Kuvaan on merkitty osittain kirjallisuuslähteiden antama kustannusten vaihteluväli.

VTT:n (Ekholm 2010) raportissa esitetyt laskelmat ei ole kuvattu julkisessa muistiossa tarkemmin. Sen sijaan VTT:n vuonna 2011 julkaisemassa työpaperissa (Hast ym. 2011) on käsitelty kustannustehokkuuden arviointia, joka perustuu stokastiseen optimointimalliin (satunnaisprosessi, joka on mallinnettu osittain epävarman tiedon perusteella). Mallin avulla on esitetty kokonaiskustannukset minimoivia eri päästövähennyskeinoista muodostettuja portfolioita eri päästövähennystasoilla. Samaa menetelmää on käytetty VTT:n vuoden 2012 tutkimusjulkaisussa (Hast ym. 2011 ja Lindroos ym. 2012a).

5.3.1 SONETS -mallin kuvaus (stokastinen optimointimalli)

VTT:n selvityksessä (Hast ym. 2011) kustannustehokkuuden arviointiin käytetystä mallista käytetään nimitystä SONETS (Stochastic Optimization of Non-ETS Emissions). Menetelmä on kehitetty ei-päästökauppasektorin kasvihuonekaasujen ja päästövähennysten mallintamiseen (Hast ym. 2011). Mallissa tarkastellaan toimien suoria kustannuksia, mutta ei esimerkiksi kansantaloudellisia kerrannaisvaikutuksia. Kustannukset on esitetty päästöjen rajoittamisen näkökulmasta eikä niitä voi suoraan kohdistaa toimijoille. Vuoden 2012 tutkimusraportissa tarkastellaan kustannusten suuruusluokkia ja niihin vaikuttavia keskeisiä muuttujia. Päästöjen perusrussa on huomioitu liikenteen biopolttoainetavoitetta ja biokaasun syöttötariffia vastaavat päästövähennykset ja kustannukset. (Lindroos ym. 2012a)

VTT:n 2011 raportin (Hast ym. 2011) mukaan mallinnuksen avulla pyrittiin löytämään keinovalikoima, jonka avulla on mahdollista minimoida kustannusten silloisen nykyarvon odotusarvo. Mallissa päätösmuuttujina käytettiin vähennystoimien aloitusvuosia ja optimaalinen päästöjen vähentämisportfolio koostui tietyllä aikavälillä aloitettavista vähennystoimista ja niiden aloitusajankohdista. Kustannusten nykyarvon laskennassa korkokantana käytettiin 5 %. Käytetyllä korkokannalla on oletettavasti vaikutuksia tuloksiin. Arvioinnissa huomioitiin ajalliset päästöjen joustomekanismit, esim. mahdollisuus siirtää enintään 5 % päästökiintiöstä seuraavalle vuodelle. (Hast ym. 2011)

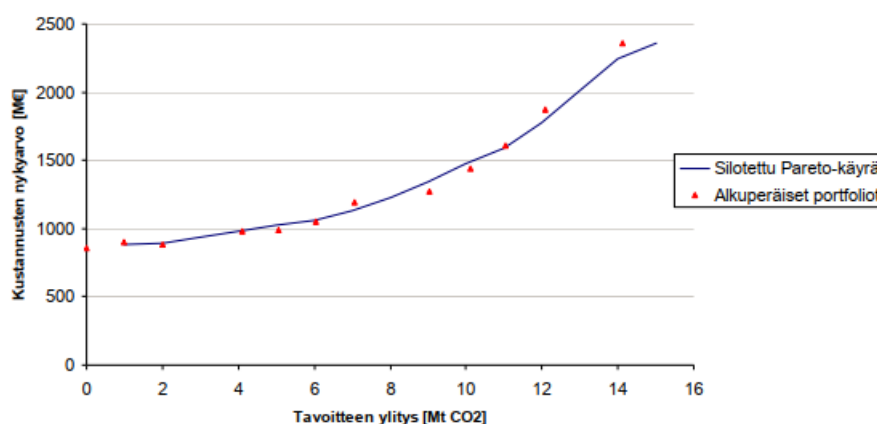
Päästövähennyskeinot on kuvattu mallissa toteutettavaksi täysimääräisesti. Toimenpiteet on pyritty rajaamaan siten, etteivät ne vaikuta päällekkäisesti tai mahdolliset päällekkäiset vaikutukset on pyritty huomioimaan etukäteen mallissa. Tällöin keinot voidaan toteuttaa tai jättää toteuttamatta itsenäisesti. Alkuinvestointeja vaativan päästövähennyskeinon kustannukset lasketaan sille vuodelle, jolloin toimenpide aloitetaan, vaikka keinon avulla on mahdollista vähentää päästöjä myös seuraavina vuosina. Toimenpiteiden päästövähennykset jaetaan kuitenkin useammalle vuodelle. (Hast ym. 2011)

Päästövähennyksiin ja kustannuksiin liittyviä epävarmuuksia tarkasteltiin eri tilanteissa (mm. päästövähennykset toteutetaan kansallisesti tai päästökauppa muiden maiden välillä). Epävarmuudet, kuten päästöjen suuruus perusrussa, päästövähennykset ja kustannukset on kuvattu mallissa todennäköisyysjakaumien avulla. Mainitut epävarmuudet aiheutuvat taustamuuttujista, kuten energian markkinahinnat sekä päästöjen muodostumiseen vaikuttavien muiden muuttujien, kuten liikennesuoritteiden ja päästökertoimien, ennusteiden epävarmuudesta. Taustamuuttujien epävarmuuksien vaikutus lopputuloksiin on määritetty Monte Carlo -menetelmän avulla. Menetelmän avulla

on selvitetty satunnaislukuja ja simulaatioita käyttäen se, millaisia jakaumia päästövähennykset ja kokonaiskustannusten nykyarvo muodostavat. Useimpien muuttujien epävarmuutta on kuvattu satunnaiskulun (random walk) avulla. Satunnaiskululla tarkoitetaan stokastista tulevaisuusprojektiota (tarkasteltavan arvon erotus kahden vuoden välillä on ennalta määrätyn todennäköisyysjakauman mukainen). Tällöin muuttujan arvo kehittyy satunnaisesti ajan myötä (esimerkiksi raakaöljyn hinnan kehitys tai henkilöajoneuvojen ajosuoritteet). (Hast ym. 2011)

Lisäksi tutkimuksessa on tarkasteltu päästövähennyskeinoihin (portfoliot) liittyviä riskejä ja määritetty päästöjen vähentämisen optimoinnissa niille rajoitusehtoja (sallitut ylärajat päästöjen ja kustannusten vaihtelulle). Samalla on arvioitu, millaisia vaikutuksia rajoituksilla on optimaalisen päästöjen vähentämisportfolion ominaisuuksiin. Ilman riskeihin liittyviä rajoitusehtoja optimointi on suoritettu päästöjen ja kustannusten odotusarvojen perusteella ja tällöin odotusarvoiltaan optimaalisista portfolioista on muodostettu Pareto-tehokkaiden portfolioiden joukko. Pareto-käyrällä pisteet ovat portfolioita, joissa päästöjen odotusarvoa ei voida pienentää kasvattamatta kustannusten odotusarvoa. Menetelmässä mallin perusteella siis tutkitaan, kuinka usein kukin keino esiintyy Pareto-tehokkaissa portfolioissa ja käyrän avulla arvioidaan, millaiset marginaaliset kustannukset kullekin päästötasolle liittyvät. Marginaalikustannusten ja päästökiintiön hinnan erotus kertoo, milloin päästövähennyksiä ei välttämättä kannata tehdä enää kansallisilla vähennystoimilla. (Hast ym. 2011)

Kuva 5-3 Kustannustehokkaiden päästövähennysportfolioiden päästötavoitteen ylitys kustannusten nykyarvon funktiona (Hast ym. 2011)

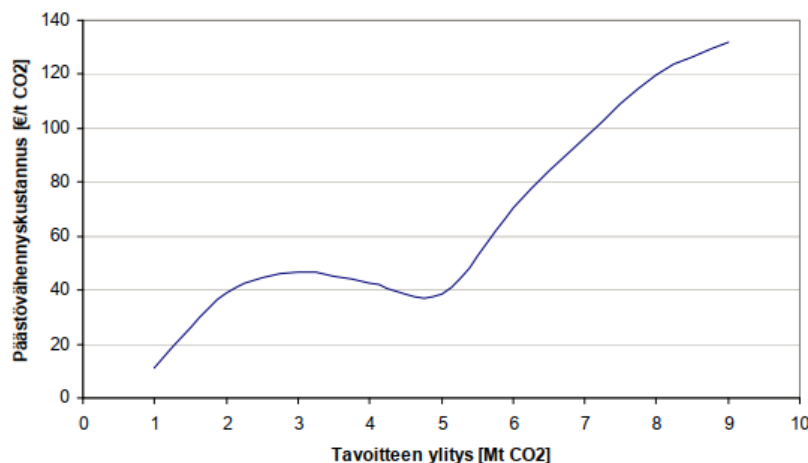


VTT:n vuoden 2011 tarkastelussa päästövähennysten optimiportfolioille oli tehty herkkyysanalyysi tutkimalla erikseen kustannuksia ja saavutettavia päästövähennyksiä.

Herkkyysanalyysin tarkoituksena on tunnistaa optimaalisten portfolioiden merkittävimmät epävarmuuksien aiheuttajat. Keskeisin näistä epävarmuuksista oli polttoaineiden hinnan kehitys. Tarkastelussa saavutettavien päästövähennysten epävarmuuteen vaikuttivat eniten samat tekijät, mutta kustannuksiin vaikuttavat tekijät olivat eri tilanteissa erilaiset. Tutkimuksessa ei tarkasteltu korrelaatioita eri tekijöiden välillä. Mikäli näitä olisi tarkasteltu, tällä voisi olla jonkin verran vaikutusta kustannustehokkuuteen. Muuttujien korreloinnin huomiointi vaikuttaisi päästövähennysportfolioiden epävarmuuksiin siten, että erisuuntaiset korrelaatiot pienentävät epävarmuutta, mutta samansuuntaiset korrelaatiot lisäävät sitä. (Hast ym. 2011)

Tehokkaiden päästövähennysportfolioiden kustannusten ja päästövähennysten vaihteluvälit olivat lähes yhtä suuret kaikilla eri päästötasoilla. Kun päästökauppaa ei voida käydä, päästövähennystavoitteet saavuttava optimitoimenpiteiden portfolio vastasi sen hetken nettoarvoltaan noin 860 milj. EUR kustannuksia (v. 2010–2020). Kasvattamalla päästövähennystavoitteen saavuttamistodennäköisyyttä (68 %:iin), kustannukset nousivat 990 milj. EUR ja odotusarvoisesti kumulatiivinen päästötavoite 5 Mt CO₂e ylittyi. Päästöjen vähentämisen marginaalikustannus olisi tällöin 40 EUR/tonni. Kokonaiskustannukset olivat noin 10 % pienemmät, mikäli päästökauppasektorin ulkopuolisilla sektoreillakin voitiin käydä päästökauppaa, mutta tällöin kustannuksiin liittyvät epävarmuudet olivat suuremmat. (Hast ym. 2011)

Kuva 5-4 Esimerkki päästövähennyskustannusten kuvaamisesta (Hast ym. 2011); päästövähennyskustannus kumulatiivisen päästötavoitteen ylityksen funktiona



VTT:n vuonna 2011 esittämässä mallissa tarkastellaan 10 vuoden ajanjaksoa. Mallia voisi tutkimuksen mukaan soveltaa myös pidemmälle ajanjaksolle, tällöin toimenpiteiden optimoinnissa voisi tulla useammin valituksi toimenpiteet, joista vähennykset syntyvät viiveellä. VTT:n mukaan päästöennusteisiin ja kustannuksiin liittyy merkittävää

epävarmuutta, joten vaadittavista vähennyskeinoista ei menetelmistä huolimatta saada välttämättä täysin varmoja arvioita. Kun syntyy uutta tietoa, päästöjen vähentämispolkujen perusuria ja lisätoimenpiteiden joukkoa tulee tarkistaa. (Hast ym. 2011 ja Lindroos ym. 2012a)

VTT julkaisi vuonna 2014 Low Carbon Finland 2050 -platform (LCFinPlat) -hankkeen loppuraportin, jossa on luotu tiekartat päästövähennystoimille. Hankkeessa luodut skenaariot on otettu pohjaksi myöhemmin PITKO-hankkeessa. Low Carbon Finland 2050 -platform -hankkeen loppuraportin mukaan skenaariotyö yhdistettynä kvantitatiiviseen mallinnukseen on erinomainen työkalu, kun tarkastellaan tulevaisuutta pitkälle eteenpäin ja kun tulevaisuuden arviointiin liittyy suuria epävarmuustekijöitä. Jatkossa vastaavassa mallinnuksessa tulisi kuitenkin paremmin pystyä kuvaamaan ja arvioimaan mm. kuluttajien ja investoijien käyttäytymisen vaikutuksia. (Koljonen ym. 2014)

5.3.2 Uusiutuvan energian politiikkatoimien vaikuttavuusarvioinnit IMPAKTI-hankkeessa

IMPAKTI-hankkeessa (VTT Oy, Benviroc Oy ja VATT) on tutkittu ilmastopoliittisten toimien kustannustehokkuutta, indikaattoreita ja vaikutuksia. Loppuraportti hankkeesta on julkaistu vuonna 2012 (Lindroos ym. 2012). Hankkeessa kehitettiin uusia menetelmiä ilmastopoliittikan vaikuttavuuden arviointiin, ja niitä sovellettiin kotimaisten uusiutuvan energian tuotantotukien arvioinnissa. Arviot laadittiin metsähakkeen, tuulivoiman, biokaasureaktorioiden ja liikenteen biopolttoaineiden edistämisen vaikutuksista vuoteen 2010 sekä päästötavoitteiden mukaiselle lisäkehitykselle vuoteen 2020. Tarkemmin arvioitiin vaikutuksia mm. kasvihuonekaasupäästöihin, valtion menoihin ja kansantalouteen. Arviot tehtiin sekä yksinkertaisilla menetelmillä että monimutkaisempina malliarvioina. (Lindroos ym. 2012)

Kehitetyt menetelmät perustuivat vaikutuskertoimiin. Esimerkiksi vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin arvioitiin uusiutuvan energian korvaaman polttoaineen tai energiantuotannon päästöjen perusteella. Metsähakkeen oletettiin korvaavan energia-sektorilla pääasiassa turvetta ja tuulisähkön lauhdesähköntuotantoa. Korvausvaikutukset tiivistettiin vaikutuskertoimiksi, joilla voidaan kertoa käytetyn polttoaineen tai tuotetun sähkön ja lämmön määrä ja saada tuloksena arvio kasvihuonekaasuvaikutuksesta. Kasvihuonekaasupäästövaikutuksia arvioitiin Kioton pöytäkirjan ensimmäisen velvoitekauden laskentasäännöillä, mutta metsähakkeen ja liikenteen biopolttoaineiden osalta tarkasteltiin laajempia rajauksia, esimerkiksi käyttäen YK:n ilmastopoliittisuuden mukaisia kasvihuonekaasuinventareja ja siten, että arviot sisälsivät myös maarajat ylittäviä tuotanto- ja käyttöketjun päästöjä. Korvauskertoimilla tehtävä yksin-

kertainen arvio ei kuitenkaan huomioi energijärjestelmän ja ilmastopolitiikan kehitystä. Sen vuoksi arviot tehtiin lisäksi TIMES-energiäjärjestelmämallilla. (Lindroos ym. 2012)

IMPAKTI-hankkeessa valtion kustannuksiin laskettiin suorat tuet ja verohelpotukset. Epäsuoria kustannuksia ja yksityisten toimijoiden kustannuksia ei huomioitu. Kustannustehokkuutta tarkasteltiin suhteessa päästövähennyksiin ja tuilla tavoiteltuihin uusiutuvan energian määriin. Päästövähennysten kustannustehokkuus laskettiin investointien eliniän yli ja uusiutuvan energian kustannustehokkuutta tarkasteltiin vuoden 2020 tasolla. Raportissa kuvattiin myös päästövaikutusten jakautumista eri sektoreille. (Lindroos ym. 2012b)

Vuonna 2009 valmistui Euroopan komission tilaamana selvitys (Forster ym., 2009), jossa ehdotettiin menetelmäkehystä politiikkatoimien päästövähennysvaikutuksen arviointiin. Forster ym. (2009) laativat arviointiin kolmen eritasoisen menetelmän kehikon, joka noudatti IPCC:n laskentaohjeiden logiikkaa: yksinkertainen Tier 1 -taso, hieinan kehitetympi Tier 2 -taso, sekä mallilaskelmiin perustuva Tier 3 -taso. Tier 1 -menetelmä tuottaa esim. tilastotiedon avulla yksinkertaistetun arvion politiikkatoimen vaikutuksesta päästöihin. Tier 2 -menetelmä pyrkii erottamaan politiikkatoimen vaikutuksen muista tekijöistä ja Tier 3 -arvio on yksityiskohtaisin, ja vaatii yleensä tiedonkeruuta ja mallinnusta. (Lindroos ym. 2012b)

Uusiutuvan energian politiikkatoimien vaikuttavuusarvioita varten kehitettiin hyödynnettäväksi yksinkertaiset menetelmät, jotka vastaavat Forsterin ym. (2009) Tier 1 ja Tier 2 -menetelmiä. Näitä yksinkertaisia arvioita varten tehtiin tarkastelut energijärjestelmä- ja kansantalousmalleilla VTT-TIMES ja VATTAGE. Kansantaloudellisista vaikutuksista raportoitiin kokonaistaloudelliset muutokset keskeisissä kansantuoteerissä suhteessa vertailuskenaarioon. Lisäksi raportoitiin verokertymien muutokset ja kuvattiin kuluttajien ostovoiman muutosta mittaavaa hyvinvoinnin muutosta rahamääräisesti. Vaikutusten määrittelyyn käytettiin politiikkaskenaarioita ja niitä verrattiin vertailuskenaarioon, joka pyrki kuvaamaan tilannetta ilman tarkasteltavia politiikkatoimia. Hankkeessa tarkasteltujen mallien vertailuskenaariot pohjautuivat Työ- ja elinkeinoministeriön vuoden 2008 pitkän aikavälin ilmasto- ja energias strategiaan ja EU:n ilmasto- ja energias strategiaan. Koska hankkeessa tarkasteltiin uusiutuvan energian hyödyntämistä, vertailuskenaarioissa huomioitiin mahdollinen päästöoikeuden hinnan kehitys (kolme eri skenaariota). Koska osa arvioiduista politiikkakeinoista olivat varsin pieniä suhteessa koko energijärjestelmään (esimerkkinä biokaasureaktorit, tuotantotavoite suhteessa koko energiankudukseen oli alle 2 promillea), joten niiden arviointia mallinnuksella ei tutkimuksessa tehty. (Lindroos ym. 2012b)

IMPAKTI-hankkeessa uusiutuvan energian päästövähennysvaikutuksia arvioitiin yksinkertaisimmillaan korvaamalla sähkön- ja lämmöntuotantoa eri polttoaineilla tai oletamalla tuotannolle jokin päästökerroin. Lisäksi mallinnus tehtiin TIMES-VTT-mallilla. Päästövähennysten yksikkökustannus eli päästövähennysten kustannustehokkuus (EUR/tCO₂) valtion kannalta laskettiin yksinkertaisella menetelmällä erikseen sekä Kioton pöytäkirjan laskentaperiaatteita noudattaen (ts. ilman metsän hiilivajeen vaikutusta) sekä metsän hiilivajeen kanssa. Metsän hiilivajeen laskennassa käytettiin keskimääräistä sadan vuoden hiilivajetta. (Lindroos ym. 2012b)

Laskentamenetelmät sisälsivät paljon oletuksia. Esimerkiksi tuulivoiman syöttötariffilla saavutettavien päästövähennysten yksikkökustannusta eli kustannustehokkuutta (EUR/tCO₂) koskeva arvio laadittiin olettaen, että laitosten tekninen käyttöikä on 20 vuotta, syöttötariffia maksetaan yhdelle voimalaitokselle 12 vuotta, tarkastelu tehdään kahdella sähkön hinnalla: 50 ja 65 EUR/MWh ja kustannukset diskontataan 5 %:n korolla. Kustannukset laskettiin valtion näkökulmasta, mutta raportissa arvioidaan, että laskelmat toimisivat hyvänä arviona myös päästövähennyskustannuksista koko energiajärjestelmälle, mikäli syöttötariffitaso valitaan onnistuneesti. Lisäksi jos yksityisten toimijoiden investoinnit muuttuvat kannattaviksi, voitaisiin ajatella, että syöttötariffi kuvaa koko energiajärjestelmän laajuista päästövähennyskustannusta. (Lindroos ym. 2012b)

Biokaasureaktoreita koskevia politiikkatoimia on arvioitu kaatopaikkakaasujen talteenoton ja maataloudessa lannan levityksen näkökulmasta. Orgaanisen jätteen sijoittaminen kaatopaikoille on ollut kiellettyä vuodesta 2016 lähtien, joten tarkoituksenmukaisin biokaasun lähde olisi näistä lannan hyötykäyttö biokaasun tuotannon raaka-aineena. Tuotettaessa lannasta biokaasua vältettäisiin lannan levityksen typpioksiduulipäästöt, ja lisäksi se voisi pienentää painetta metsän raivaamiseen pelloksi, mitä tehdään tällä hetkellä ylimääräisen lannan levittämiseksi. Tämä johtuu siitä, että peltohehtaarille on määritelty lannan levitykselle yläraja haitallisten vesistövaikutusten estämiseksi. (Lindroos ym. 2012b)

Biokaasun tuotannossa tarkka kustannustehokkuuden arviointi vaatisi lukuisia oletuksia rakennettavista biokaasureaktorityypeistä, raaka-ainejakeista ja niiden vaihtoehtoisista käyttötavoista eri puolilla Suomea. IMPAKTI-hankkeen loppuraportin mukaan ei ole myöskään selvää, että muutokset näkyisivät Suomen kasvihuonekaasuinventaarissa. Koska biokaasun tuotannon tukemiseen liittyvät politiikkatoimet ovat pienimpiä kaikista arvioiduista, raportissa päädyttiin arvioimaan vain raaka-aineiden vaihtoehtoisista käyttötavoista vapautuvien päästöjen suuruusluokkaa. (Lindroos ym. 2012b)

Biokaasun tuotannon osalta IMPAKTI-hankkeessa arvioitiin myös vain syöttötariffilla saavutettavien päästövähennysten kustannustehokkuutta. Arviossa oletettiin, että laitosten tekninen käyttöikä on 20 vuotta (aikaväli jolle päästövähennykset kohdistuvat),

syöttötariffia maksetaan yhdelle laitokselle 12 vuoden ajan, sähkön hinta on 50 tai 65 EUR/MWh koko tarkastellun ajanjakson ajan, laitoksille maksetaan 50 EUR/MWh lämpöpremio ja kustannukset diskontataan 5 %:n korolla. Laskelma kattoi ainoastaan syöttötariffista aiheutuvat suorat kustannukset valtiolle ja jätti huomioimatta laitosten rakennuksen, käytön ja huollon kustannukset. Arvion mukaan, mikäli metaani- ja typpioksiduulipäästöt vähenevät suurempien kertoimien mukaisesti, biokaasun syöttötariffin päästövähennysten kustannustehokkuus voisi olla 20–25 EUR/tCO_{2e}. Raportissa nostetaan esille, että epävarmuuksista huolimatta metaanin ja typpioksiduulin osuuksia kasvihuonekaasuvähennyksissä tulisi arvioida tarkemmin, sillä niiden ilmastoa lämmittävä vaikutus on suuri. (Lindroos ym. 2012b)

IMPAKTI-hankkeen loppuraportissa kuvattiin aiempia maatilakokoluokan biokaasulaitosten kannattavuustarkasteluja. Kannattavuusselvityksessä (Hagström, 2005) arvioitiin, että suurikokoisella sikatilalla päästäisiin noin 100 EUR/tCO_{2e}:n päästövähennyskustannukseen silloin, kun kaikki kustannukset ja päästövähennykset otetaan huomioon. Vuonna 2011 julkaistun Biotila-hankkeen kannattavuustarkastelujen mukaan maatilakokoluokan biokaasulaitokset olisivat nykyisillä tukitoimilla taloudellisesti kannattavia, jos raaka-aineesta saadaan porttimaksuja tai kaikki tuotettu sähkö ja lämpö voidaan hyödyntää korvaamaan öljyn käyttöä (Taavitsainen, 2011). Raportissa esitetyn perusteella biokaasulaitosten taloudellinen kannattavuus saattaisi parantua merkittävästi, jos kotimaisten päästövähennysten hyvitysjärjestelmä toteutuisi (Mikkanen ym. 2011). Hyvitysjärjestelmässä toimijoille myönnettäisiin rahallinen korvaus vastineeksi aikaansaadusta ja todennetusta päästökaupan ulkopuolisesta päästövähennyksestä. (Lindroos ym. 2012b)

Liikenteen osalta tarkasteltuja politiikkatoimia olivat IMPAKTI-hankkeessa jakeluvelvoite, valmisteveroalennus ja investointituet. Liikenteen ex ante -päästövaikutuksia on arvioitu tehden oletuksia mm. jakeluvelvoitteen myötä syntyvästä uusiutuvan energian tuotannon kasvusta ja tuplalaskettavista määristä biopolttoaineita, Suomeen rakennettavista uusista suurista biojalostamoista. Lisäksi hankkeessa on käytetty Suomen arvioita uusiutuvan energian käyttömäärien kasvusta perustuen kansalliseen uusiutuvan energian toimenpidesuunnitelmaan (NREAP Finland 2010). Päästöt eri politiikkatoimille on laskettu huomioiden niiden aiheuttama vaikutus korvatesa fossiilisia polttoaineita, esimerkiksi RES-direktiivin mukaisia oletuspäästökertoimia käyttäen. Raportissa todetaan muihin julkaisuihin viitaten, että uusiutuvan polttoaineen jalostuksessa keskeisimmäksi lopputulokseen vaikuttavaksi tekijäksi muodostuivat käytetyn sähkön tuotannon päästökerroin ja metsätähteen korjuusta syntyvä maaperän hiilivarastojen pieneneminen. (Lindroos ym. 2012b)

IMPAKTI-hankkeen loppuraportin perusteella suositeltiin, että eri politiikkatoimien vaikuttavuusarvioinneissa otettaisiin huomioon maan rajojen sisäpuolella tapahtuvien vaikutusten lisäksi vaikutukset muissa maissa sekä vaikutukset niillä sektoreilla, jotka

ovat päästövähennystavoitteiden ulkopuolella. Vaikutusten arvioimiseksi ja esittämiseksi tulisi luoda yhtenäisiä menetelmiä ja raportointitapoja. IMPAKTI-hankkeessa kehitettyjä menetelmiä voidaan soveltaa määräjain tehtävissä raportoinneissa EU:lle ja YK:lle. Uusiutuvan energian politiikkatoimien arvioinnin katsottiin edellyttävän vielä lisätutkimusta. Esimerkkinä mainittiin biokaasulaitokset, joissa päästövähennysvaikutus ja toimenpiteiden kustannustehokkuus riippuvat huomattavasti biokaasun raaka-aineiden vaihtoehtoisten käyttötapojen metaani- ja typpioksiduulipäästöstä. Suurimpia epävarmuuksia liittyi raportin mukaan metsähakkeen käytön vaikutuksista maaperän hiilitaseeseen sekä siihen, mitä energiamuotoa uusiutuvan energian lisäkäyttö korvaa. (Lindroos ym. 2012b)

5.3.3 Sitran kestävästä verouudistusta koskevan raportin kustannus- ja päästövähennysarviot

Sitra on uusimmassa julkaisussaan (Tamminen ym. 2019) käsitellyt kestävään kehitykseen perustuvaa verouudistusta, sen toimenpiteitä ja mahdollisia vaikutuksia. Raportissa on esitetty esimerkkejä mallinnoista ja niiden vaikutuksista. Arvioinnissa hyödynnettiin kansantaloutta kuvaavaa laskennallista FINAGE-tasapainomallia ja verouudistuspaketin mallinnus tehtiin E3ME-tasapainomallilla. Tutkimuksessa korostettiin etenkin päästövähennysten, kulutuksen ja luonnonvarojen käyttöön kohdistuvien veroinstrumenttien, kuten päästö-, energia-, jäte- ja luonnonvaraverojen, vaikutusten analysointia. Esimerkkiarvioinnissa FINAGE-mallista on käytetty versiota, joka huomioi erityisesti autokannan ja erilaisten käyttövoimien vaikutukset verotuksen kannalta. Mallinustekniikka on kuvattu raportissa Green Budget Europe ym., 2018. (Tamminen ym. 2019)

Sitran kestävästä kehityksen verouudistuksen vaikutusarviot ovat luonteeltaan alustavia. Suosituksena on esitetty, että laaja-alaisempien vaikutusanalyysien tekemiseksi voitaisiin hyödyntää esimerkiksi mikrosimulaatiomalleja, jotta esimerkiksi aluekohtaisia vaikutuksia kotitalouksiin on mahdollista analysoida. Esimerkkimalleissa päästövähennyksiä tarkastellaan suuntaa-antavina arvioina. Tämä johtuu mm. siitä, että maleissa käytetyssä FINAGE-talouksmallissa ei ole energiantuotantoa tarkasti mallintavaa osaa. Päävaikutuksia on tarkasteltu seuraavien kysymysten kautta: vähenevätkö päästöt, kasvaako talous ja lisääntykö työllisyys. Arvioituja päästövähennyksiä, bruttokansantuotetta ja työllisyyden muutoksia kansantalouden tasolla verrataan perusuraan, joka on se, että uudistuksia ei olisi tehty. Raportin tuloksina on arvioitu, että päästö- ja luonnonvaraveroilla voidaan tehokkaasti vähentää päästöjä samalla kuin varmistetaan myös työllisyyden kasvu. (Tamminen ym. 2019)

5.3.4 Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi

Valtioneuvoston kanslian julkaisemassa raportissa ”Biopolttoaineiden kustannustehokkaat toteutuspolut vuoteen 2030” (Sipilä ym. 2018) on tarkasteltu taakanjakosektorin päästövähennysten toteuttamisen vaikutuksia vuoteen 2030 saakka liikenteen osalta. Työ tehtiin kolmessa vaiheessa, joista ensimmäinen määritteli nykytilan ja tarpeen tavoiteltaessa liikenteen 50 % päästövähennemää ja 30 % biopolttoaineosuutta. Sen perusteella määritettiin uuden kapasiteetin tarve ja eri tuotantoreittien kustannusrakenteet sekä teknisen kehityksen arviot vuoteen 2030. Työn toisessa osassa luotiin realistiset biopolttoainepolut Suomelle. Toteutuspoluille määritettiin polttonesteiden keskimääräiset hintavaikutukset energia- ja ilmastostrategian mukaisesti. Tämän jälkeen työn kolmannessa vaiheessa arvioitiin valittujen biopolttoaineiden toteutuspolkujen kustannusvaikutuksia loppukäyttäjille sekä valtiontaloudellisia vaikutuksia. Lisäksi määritettiin toimia, joilla valitut polut voitaisiin toteuttaa kustannustehokkaasti tavoitteiden mukaisessa aikataulussa. Polttoainemäärät toteutuspoluilla ja laskennan muut lähtöarvot perustuivat olemassa oleviin tietoihin. Toteutuspolkujen arvioinnissa huomiointiin uusitun uusiutuvan energian direktiivin (RED II) vaikutuksia. (Sipilä ym. 2018)

Laskelmat tehtiin kahdelle biopolttoaineiden jakeluelvoitteen toteutuspolulle kolmella eri jakeluelvoitevaihtoehdoilla ja kolmella eri hintaskenaariolla. Hinnat vaihtelivat sen mukaan, paljonko polttoaineisiin sekoitetaan kehittynyttä biodieseliä, jonka hintaanuste oli korkein. Kustannusvaikutusten arvioinnissa tavoite- ja peruspolkua verrattiin vertailupolkuun, jotta saatiin selville aiheutuvat lisäkustannukset eri polttoainekäyttäjille. Tulokset raportoitiin pääosin prosentuaalisina muutoksina vertailupolkuun nähden. Vertailupolku sisälsi muutoin samat oletukset kuin tavoite- ja peruspolku, mutta vertailupolussa eri sekoitteiden sisältämien fossiilisten polttoaineiden ja biokomponenttien osuuksien oletettiin pysyvän nykyisen jakeluelvoitteen mukaisena. Laskelmat tehtiin vuosille 2020, 2025 ja 2030. Lisäksi polttoaineiden hintaennusteille tehtiin taloudellisten vaikutusten herkkyyden tutkimiseksi minimi- ja maksimiennusteet pitkälle aikavälille. (Sipilä ym. 2018)

Selvityksessä laskettiin hinnanmuutoksien vaikutukset eri käyttäjille ja toimialoille sekä suorien että (laajempien) epäsuorien vaikutusten pohjalta. Lisäksi näiden tulosten perusteella arvioitiin vaikutuksia kuluttajille. Epäsuoria vaikutuksia arvioitiin ns. ”cost-push”-panos-tuotomallinnuksen mukaisesti. Koska polttoaineen hinnan vaikutus kysyntään määrän on tutkimusten mukaan pieni, hinnan vaikutusta polttoaineen kulutukseen ei mallinnettu. Raportissa esitetyt verotuottolaskelmat perustuvat polttoaineiden kulutusmääriin. Selvityksessä arvioitiin kansantaloudellisia vaikutuksia kuluttajille ja julkiseen talouteen kohdentuvia lisäkustannuksia, jotka johtuvat hinnan muutoksista

tai epäsuorista hinnankorotusvaikutuksista eri toimialoilla. Tulokset on esitetty kustannusvaikutusten suhteellisena muutoksena (%) ja vaikutuksia on tarkasteltu osa-alueittain tekstissä. Myös herkkyyštarkastelut on esitetty muutoksena eri vaihtoehtojen välillä. Ulkomaankauppaa koskevia vaikutuksia on tarkasteltu yleisellä tasolla. Työssä esitetyt vaikutusarviot suhteessa kansantalouteen ovat karkeita ja kattavat vain osan potentiaalisista vaikutuksista. Lisäksi suorat kustannusarviot valtiontalouteen (esimerkiksi verokertymään) on esitetty suuntaa-antavina. (Sipilä ym. 2018)

Selvityksen perusteella suurimmat epävarmuudet kustannusten kehittymisen osalta liittyivät energiatehokkuuden kasvuun ja sen ajoittumiseen. Energiatehokkuudella nähtiin erittäin tärkeä rooli biopolttoaineiden aiheuttamien lisäkustannusten hallinnassa. Esimerkiksi jos energiatehokkuuden vaikutus liikenteen energiankulutukseen ajoittuisi ajanjaksolle 2020–2030, tulisi päästöjä vähentää biopolttoaineilla jakson puoliväliin mennessä suhteessa enemmän. Päästöjen vähentäminen vaaditulla tavalla edellyttäisi raportin mukaan välitarkastelupisteitä. Polttoaineen jakeluvaihtoehtoon liittyvien kustannusten osalta todetaan, että nykyisessä tilanteessa, jossa toimijat saavat itse valita biokomponentin, kustannukset tulevat olemaan matalat. Kuitenkin myös markkinatilanne voi vaikuttaa tehtäviin valintoihin. (Sipilä ym. 2018)

Liikenteen energiatehokkuustoimenpiteiden taloudellisia vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin nähden on arvioitu Valtioneuvoston kanslian julkaisussa vuodelta 2015 (Tuominen ym. 2015). Raportin näkökulma on alueellinen. Arvioinnissa tarkasteltiin toimenpiteiden vaikutuksia liikenteen suoritemääriin ja CO₂-päästöjen määriin. Lisäksi arvioitiin taloudellista merkitystä toteutuskustannuksina ja päästövähennysten taloudellisena arvona. Päästövaikutusten arvioinnissa määriteltiin energiatehokkuustoimenpiteiden kohdistuminen eri kulkumuodoille sekä vaikutuspotentiaali. Päästöjen vähentämisen toimenpidekustannuksia verrattiin aikaansaataavan päästöjen vähenemisen arvoon. Päästövähennyksille laskettiin niiden ajallisen toteutumisen (vuoteen 2030) mukainen nykyarvo. Kustannusten laskennan perusteita ei ole käsitelty tarkemmin, mutta raportissa on esitetty arviointiin perustuvia päätelmiä liikenteen energiatehokkuustoimenpiteiden kustannusvaikutuksista. (Tuominen ym. 2015)

Liikenne- ja viestintäministeriön selvityksessä ”Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045” (Särkijärvi ym. 2018) on arvioitu keinoja, joilla Suomen liikenteen kasvihuonekaasupäästöt on mahdollista vähentää nollaan vuoteen 2045 mennessä. Toimenpiteiden aikahorisontti on seuraavat kaksi hallituskautta. Työryhmä on kuvannut kolme vaihtoehtoista skenaariota, joilla tavoitteeseen voidaan päästä. PALVELU-skenaario tarkastelee liikennejärjestelmän energiatehokkuutta, TEKNO-skenaario liikennevälineitä ja BIO-skenaario uusiutuvia polttoaineita. Toimenpideohjelman tavoitteena on ollut henkilöautojen suoritteiden eli ajokilometrien kasvun taittuminen vuonna 2025, liikennevälineiden uusiutumisen nopeutuminen sekä nestemäisten biopolttoaineiden osuuden kasvu niin, että vuonna 2030 niiden osuus on 30 % ja vuonna 2045 100 %

kotimaisessa liikenteessä. Taustalaskelmana autokannan kehittymisestä ja liikenteen kokonaisenergiankulutuksesta on käytetty VTT:n tekemiä laskelmia vuosille 2017–2045. (Särkijärvi ym. 2018)

Selvityksessä on arvioitu toimenpideohjelman vaikutuksia päästövähennysten kannalta laadullisesti ja raportissa on esitetty arvioita päästövähennyspotentiaalista. Raportissa on esitetty toimenpiteitä, vaikutusmekanismeja, toimien tuomia päästövähennyksiä (CO₂), niiden arvioituja euromääräisiä kustannuksia valtiolle tai kunnille sekä vaikutuksia kotitalouksille ja elinkeinoelämälle. Toimenpiteitä on tutkittu kestävä liikumisen, tehokkaiden tavarankuljetusten, nolla- ja vähäpäästöisten liikennevälineiden sekä uusiutuvien polttoaineiden osalta. Päästövähennysarviot perustuvat kirjallisuudesta saatuun tietoon ja kustannusvaikutukset on kuvattu esimerkinomaisina. Myös osa kustannusvaikutusten arvioinnista on laadullisia. (Särkijärvi ym. 2018)

5.3.5 Maataloussektorin päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi

Samanaikaisesti PITKO-hankkeen loppuraportin kanssa on julkaistu loppuraportti MALULU-hankkeesta. Raportissa kuvataan maatalous- ja LULUCF-sektorien päästökehitystä eri skenaarioiden mallinnukseen perustuen. Työssä on laadittu määrälliset laskelmat ja tiettyihin oletuksiin perustuvat arviot (systeminen/ dynaaminen tarkastelutaso) päästöjen kehityksestä. Maataloussektorin skenaariot on tuotettu käyttämällä Luonnonvarakeskuksen DREMFA-ktorimallia ja kasvihuonekaasuinventaarion menetelmiä. Metsäskenaarioiden laadintaan käytettiin MELA2016-ohjelmistoa. Maaperän hiilivaraston muutokset mallinnettiin Yasso07-maamallilla. Lisäksi raportissa on arvioitu taloudellisia, sosiaalisia ja ympäristöllisiä vaikutuksia laadullisena asiantuntija-arviona. MALULU-hankkeen tuloksia on hyödynnetty PITKO-raportin laadinnassa. (Aakkula ym. 2019)

Suomen ilmastopaneeli on raportissaan 1/2014 (Ollikainen ym. 2014) tarkastellut maataloussektorin päästövähennyspotentiaalia ja kustannusvaikutuksia. Raportissa tarkastellaan toimia, jotka tuottavat suurimmat päästövähennykset oletetulla taloudellisella kustannuksella. Tarkastelu on kohdistettu erityisesti eloperäisiin maihin, joilla on maatalouden päästöjen kannalta suurin merkitys. Kustannusten laskennassa on käytetty sen hetkisiä hintatietoja. Osa tarkastelun lähtötiedoista on peräisin kirjallisuudesta. Tarkastelu ei huomioi maatalouden viljelijätukia (vrt. lisätuet, kuten ympäristöhoitonurmista tai biokaasun investointituki), sillä ne eivät vaikuta ilmastotoimenpiteisiin. Pidempien investointien korkokantana on käytetty laskelmissa 3 prosenttia, mutta

korkotasoa on vaihdeltu herkkyyksanalyysissa. Määritetyt kustannukset kuvaavat toimenpiteiden keskimääräisiä vaikutuksia viljelijälle sekä yhteiskunnalle. (Ollikainen ym. 2014)

Viljelijän kustannus on se tulon menetys, joka aiheutuu ilmastotoimien toteuttamisesta, määriteltynä alkuperäisen voiton ja toimenpiteen toteuttamisesta koituvan uuden voiton erotuksena. Jakamalla tämä kustannus saavutetulla kasvihuonekaasujen päästövähennyksellä saadaan päästöjen vähentämisen yksikkökustannus. Tulokset on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 5-5).

Kuva 5-5 Maataloussektorin päästöjä vähentävien toimenpiteiden kustannukset (Ollikainen ym. 2014)

	Päästöjen ja haitan lähtötila (kg/ha, €/ha)			Päästöjen ja haitan vähennys (kg/ha, €/ha)			Yksityiset ja yhteiskunnalliset kustannukset		
	kg/ha	€/ha	kg/ha	kg/ha	€/ha	kg/ha	viljelijä	yhteiskunta	
	CO ₂ -ekv.	haitta	N ₂ O	CO ₂ -ekv.	haitan lasku	N ₂ O	€/ha	€/CO ₂ -ekv. t	€/N ₂ O t
Väkilannoitus / vähennys 15 % (eloperäinen)	715	25	456	107	4	68	34	318	489
Väkilannoitus / vähennys 15 % (kivennäismaa)	1192	42	780	179	6	114	19	106	166
Viherkesanto / ohran viljelyn sijaan (eloper.)	13 270	465	4780	7600	266	2330	220	29	94
Viherkesanto / ohran viljelyn sijaan (kivennäis)	2649	93	384	2907	89	-554	220	76	-
Biokaasu / lanta ja nurmi (korko 3 %)	13 326	466	5996	14 391	504	51	121	8,5	2373
Biokaasu / lanta ja nurmi (korko 5 %)	13 326	466	5996	14 391	504	51	329	23	6451
Metsitys / ohran viljelyn sijaan (eloperäinen)	13 270	465	4780	9966	349	1949	172	17	88
Metsitys / ohran viljelyn sijaan (kivennäismaa)	2649	93	384	7734	271	-554	172	22	-

Laskelmien perusteella metsitys, viherkesannoiti ja (tilakohtainen) biokaasutus ovat maatalouden kustannustehokkaimmat ilmastotoimet. Raportin yhteenvedossa on todettu, että päästövähennystavoitteen saavuttaminen edellyttää peltojen lannoitekäytön ja märehitöiden määrän optimoinnin lisäksi maankäyttöön liittyvien ratkaisujen käyttöönottoa. Maankäytön vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöjen kehitykseen korostaa myös IPCC:n viimeisin erikoisraportti elokuulta 2019 (Climate Change and

Land, 2019). Ilman maankäytön ratkaisujen käyttöönottoa päästövähennysten kustannusten arvioisaan nousevan merkittävästi. (Ollikainen ym. 2014, IPCC 2019).

Luonnonvarakeskus (Winqvist ym. 2015) on tarkastellut vuonna 2015 raportissa ”Maatilojen biokaasulaitosten kannattavuus ja kasvihuonekaasujen päästövähennys” maatilakokoluokan biokaasulaitosinvestointien kannattavuutta ja muodostuvia päästövähennyksiä. Arviointi pohjautuu investointikustannusten laskentaan kahden esimerkin perusteella (tilakohtainen ja tilojen yhteinen biokaasulaitos). Laskelmien mukaan biokaasulaitos vähentäisi tilan kasvihuonekaasupäästöjä noin viidenneksellä. Raportissa ei ole kuvattu päästövähennysten kustannustehokkuutta, mutta sen sijaan maatilakokoluokan tai tilojen yhteisen biokaasulaitosinvestoinnin kustannusrakenne on kuvattu yksityiskohtaisesti. Lypsykarjatiloiilla maidontuotannon optimointi perustuu lypsyrobotin kapasiteettiin, joka on noin 50–60 lehmää. Laskelmien perusteella investointikustannusten vaikutus on pienempi tilalla, jolla on kolme lypsyrobotia, eli enintään 180 eläintä. (Luonnonvarakeskus 2015a)

Luonnonvarakeskuksen toisessa vuonna 2015 julkaisemassa raportissa ”Maatalouden energia- ja ilmastopoliittikan suuntia vuoteen 2030” (Rikkonen, P. 2015) on tarkasteltu erilaisia maatalouden päästöjen hillintäkeinoja Suomessa. Laskelmien mukaan havaituista keinoista nautatilojen kontribuutiolla eloperäisten maiden nurmipeitteisyyteen sekä tuottavuuden parantaminen kotieläinsektorilla jalostusmenetelmien avulla on mahdollista saavuttaa kustannustehokkaasti 6,3 % vähennys päästöissä, kun maataloussektorin päästövähentämistavoitteena on 13 %. Päästövähennyksen yksikkökustannukset ovat kuitenkin tilakohtaisia ja vaativat lisätutkimusta esimerkiksi kustannusten jaon osalta. Sektorilla tarvittavien lisävähennyksien saavuttamiseksi tulisi investoida päästöjä vähentävään teknologiaan. (Luonnonvarakeskus 2015b)

5.3.6 Jätehuollon päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi

Pöyry Management Consulting Oy on tarkastellut vuonna 2012 Työ- ja elinkeinoministeriön tilaamassa selvityksessä jätteen energiakäytön siirtämistä taakanjakosektorilta päästökauppaan. Raportissa on tarkasteltu päästöjen vähentämistä sekä jätteiden energiahyötykäytön roolia. Selvityksessä on tarkasteltu kolmea eri vaihtoehtoa, joista yhdessä jätteenpolttolaitokset (lukuun ottamatta vaarallisen jätteen käsittelyä polttamalla) otetaan mukaan päästökauppaan. Selvityksen mukaan päästökauppaan kuulumisen aiheuttaisi jätteenpolttolaitoksille lisäkustannuksen, jonka laitokset todennäköisesti pystyisivät siirtämään pääosin eteenpäin jätteenporttimaksun ja tuotetun energian myyntihinnan kautta. Selvitys on perustunut kirjallisuuteen ja asiantuntija-arvioon. (Pöyry 2012)

Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutuksia ja kustannuksia on tarkasteltu Suomen ympäristökeskuksen julkaisussa vuodelta 2008 ” Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutukset ja kustannukset – jätehuollon vaihtoehtojen tarkastelu alueellisesta näkökulmasta” (SYKE 2008). Raportissa on tarkasteltu eri jätelajien käsittely-, hyödyntämis- ja/tai loppusijoitusvaihtoehtojen kustannuksia. Lisäksi raportti esittää alueelliset kustannukset ja ympäristövaikutusten tarkastelut erilaisiin skenaarioihin perustuen. Kustannusten tarkastelu on pohjautunut elinkaariarvioinnin menetelmiin. Jätteiden käsittelyn ja hyödyntämisen nettokustannukset on laskettu elinkaaren ajalta laskemalla yhteen yksityistaloudelliset nettokustannukset ja ns. ympäristönetto-kustannukset. Yksityistaloudellisia kustannuksia ovat tavanomaiset investointi- ja käyttökustannukset. Yksityistaloudellisissa nettokustannuksissa mahdolliset vältetyt tuotannon kustannukset vähennetään jätteen hyödyntämisketjun kustannuksista. Ympäristönettokustannukset taas muodostuvat päästövähennysten synnyttämistä ympäristökustannuksista ja vältettyjen päästövaikutusten eli ympäristöhyvitysten rahallisesta arvosta. (SYKE 2008)

Kokonaisuudessaan laskenta muodostui seuraavasti (SYKE 2008):

Yhteiskunnalliset nettokustannukset = Jätteen hyödyntämisketjun kustannukset – Vältetyt tuotannon kustannukset + Ympäristökustannukset – Ympäristöhyvitykset

Tarkastelutasona on koko jätteen hyödyntämisketju ja tulokset on esitetty kustannusten ja päästöjen osalta eriteltynä. Raportissa on laskettu hyödyntämisketjujen mahdolliset ympäristöhyvitykset, mutta kustannuksia ei ole esitetty erikseen suhteessa niihin. (SYKE 2008)

5.4 Yhteenvedo kustannustehokkuuden arvioinnista Suomessa

Päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuutta ei ole tähän saakka systemaattisesti arvioitu Suomessa. Kustannustehokkuuden arviointi on pohjautunut pääosin VTT:n ja muiden tutkimuslaitosten mallinnuksiin, kuten SONETS (Stochastic Optimization of Non-ETS Emissions) ja VTT-TIMES-malli. Arviointeihin on sisällytetty epävarmuuksien huomioon ottamista ja herkkyystarkasteluja. Taakanjakosektorin päästöjen vähentämisen kustannuksia on käsitelty osittain kokonaisuutena ja osin kustannustehokkuuden arviointia koskevat raportit ovat sisältäneet sekä taakanjakosektorin että päästökaupan päästöjen arviointia kustannustehokkuuden näkökulmasta. Raporttien perusteella ei saa yksityiskohtaista kuvaa siitä, miten kustannustehokkuuden arvioin-

nissa käytetyt laskelmat on tehty. Menetelmät ovat kuitenkin olleet varsin yhdenmukaisia. Esimerkkinä mallintamisen sovelluksista on uusiutuvan energian vaikuttavuusarviointeihin liittyvä IMPAKTI-hanke (Lindroos ym. 2012b). Tässä hankkeessa kehitettiin yksinkertaiset menetelmät, jotka vastaavat Forsterin ym. (2009) Tier 1 ja Tier 2 -menetelmiä. Näitä yksinkertaisia arvioita varten tehtiin tarkastelut energiajärjestelmä- ja kansantalousmalleilla.

Suurimpia epävarmuuksia sisältyy liikenteen, maatalouden ja LULUCF-sektorin tarkasteluihin, joiden päästövaikutukset ovat suuria. Liikenteen päästöjen kustannustehokkuuden arviointi keskittyy biopolttoaineiden kysyntään, tuotantoon ja käyttöön sekä kannustimien vaikuttavuuteen ja ajoneuvokannan käyttövoimaan (sähkö tai biopolttoaine). Myös energiatehokkuustoimenpiteiden kustannusvaikutuksia on käsitelty. Maataloudessa päästöjen vähentämiskustannukset kytkeytyvät vahvasti maatilakoh- taiseen kannattavuuteen. Jätehuollon piirissä kustannusvaikutusten arviointi koskee jätteiden käsittelyketjujen kustannuksia ja sitä kautta jätelaitosten kannattavuutta. Lisäksi jätehuollon osalta on tarkasteltu kustannusvaikutuksia jätteenpolton siirtämisestä päästökaupan piiriin. Kiertotalouden mahdollisia vaikutuksia päästöjen kustannustehokkuuden arviointiin ei ole mallinnettu, mutta mahdollisia vaikutuksia on sivuttu PITKO-raportissa. Suomen ympäristökeskuksessa on parhaillaan käynnissä TRANS-CIRC-tutkimushanke, jossa ympäristölaajennettua panos-tuotosanalyysia yhdistetään dynaamiseen talousmallinnukseen.

6 Menetelmät kustannustehokkuuden arviointiin

Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta on monitahoinen kokonaisuus ja eri lähestymistapoja sekä menetelmiä on useita. Kustannustehokkuuslaskennasta on olemassa suhteellisen vähän kokoavia selvityksiä. Tässä luvussa esitetään kustannustehokkuuslaskenta ja siihen liittyvät kysymykset yleisellä tasolla. Kappaleessa esitetään keskeisimmät laskennassa esiintyvät elementit ja niihin liittyvät kysymykset, kuten millä tavalla skenaarioita muodostetaan, miten kustannukset huomioidaan ja millä tavalla päästövähennyksistä ja kustannuksista päädytään lopulta päästövähennysten kustannustehokkuuteen. Lisäksi luvun lopussa esitetään muutama olemassa oleva laskentaohjeistus, joiden tavoitteena on standardisoida laskentaperiaatteita osassa tarkastelluista maista. Kappale toimii myös alustuksena luvun 7 yksityiskohtaisimmille sektorianalyysille sekä pohjana viimeisen luvun johtopäätöksille ja kehitysehdotuksille.

6.1 Kustannustehokkuuslaskennan elementit ja kysymykset

Kustannustehokkuuslaskentaan liittyy useita eri osioita, joita on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 6-1). Jokaiseen osakokonaisuuteen liittyy erilaisia kysymyksiä ja tapoja käsitellä niitä. Kuvassa esitetty kokonaisuus on muodostettu tämän työn osana kuvaamaan kustannustehokkuuslaskentaa yleisellä tasolla. Kuvassa ristikkäisvaikutukset on esitetty omana osakokonaisuutena, vaikka ne eivät itsessään ole laskennan osakokonaisuus, koska ne luovat taustalla olevan ”dynamiikan”, joka puolestaan vaikuttaa itse laskentaan soveltuvien menetelmien, epätarkkuuksien yms. osalta. Ristikkäisvaikutusten tunnistaminen voi olla osa laskentakokonaisuutta, kuten esimerkiksi Isossa-Britanniassa muodostetussa laskentakehikossa (BEIS, 2018), joka esitetään tarkemmin seuraavassa osiossa.

Kuva 6-1 Yleiset päästövähennysten kustannustehokkuuden laskennan osakokonaisuudet

Osakokonaisuus	Kysymykset
Toimenpidearvioinnin tavoite	<ul style="list-style-type: none"> Onko arvioinnin tavoitteena vertailla toimenpiteiden kustannustehokkuutta, arvioida toimenpiteestä aiheutuvia kustannuksia vai suunnitella ohjauskeinoa?
Tarkastelujakso	<ul style="list-style-type: none"> Vertaillaanko päästövähennyksiä nykytasoon, vai tiettyyn ajanhetkeen? Mikä on tarkastelun ajanjakso –päästövähennyksiä esim. vuonna 2030 vai kumulatiivisia päästöt vuonna 2030?
Perusura ja skenaariot	<ul style="list-style-type: none"> Miten muodostetaan perusura? Mitä oletuksia tehdään teknologian kehityksen ja maailmantalouden suhteen? Miten muodostetaan vastaskenaariolle jolla arvioidaan päästövähennyksiä perusuraa vasten?
Laskenta- ja mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> Valitaan soveltuva laskentamenetelmä toimenpiteiden, interaktioiden ja sektorin huomioon ottaen Mitä eri kustannustehokkuuden arviointimalleja on? Markkinamallinnus, yksittäismallinnus, ...
<i>Ristikkäis- ja epäsuorat vaikutukset</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mitkä ovat keskeisimmät interaktiot toimenpiteiden välillä, sektorien välillä? Onko kompensatiovaikutuksia, aikavaikutuksia, polkuriippuvuuksia? Millä tavalla toimenpiteet vaikuttavat toisiinsa päästövähennys/kustannusnäkökulmasta?
Kustannusnäkökulma	<ul style="list-style-type: none"> Millä tasolla kustannuksia arvioidaan? Projekti/teknologia/sektori/kansantalous Arvioidaanko kustannusten kohdentumista yksilöille tai valtiolle? Millä korolla kustannuksia diskontataan?
Tulosten esittäminen	<ul style="list-style-type: none"> Millä tavalla tulokset esitetään? <ul style="list-style-type: none"> – EUR/tCO_{2e}, %BKT, kokonaiskustannukset Käytetäänkö esim. MAC-käyriä?
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Tarkastellaanko muita hyötyjä, kuten pienhiukkasäättöjä tai laajempia kansantaloudellisia hyötyjä, kuten työllisyyttä

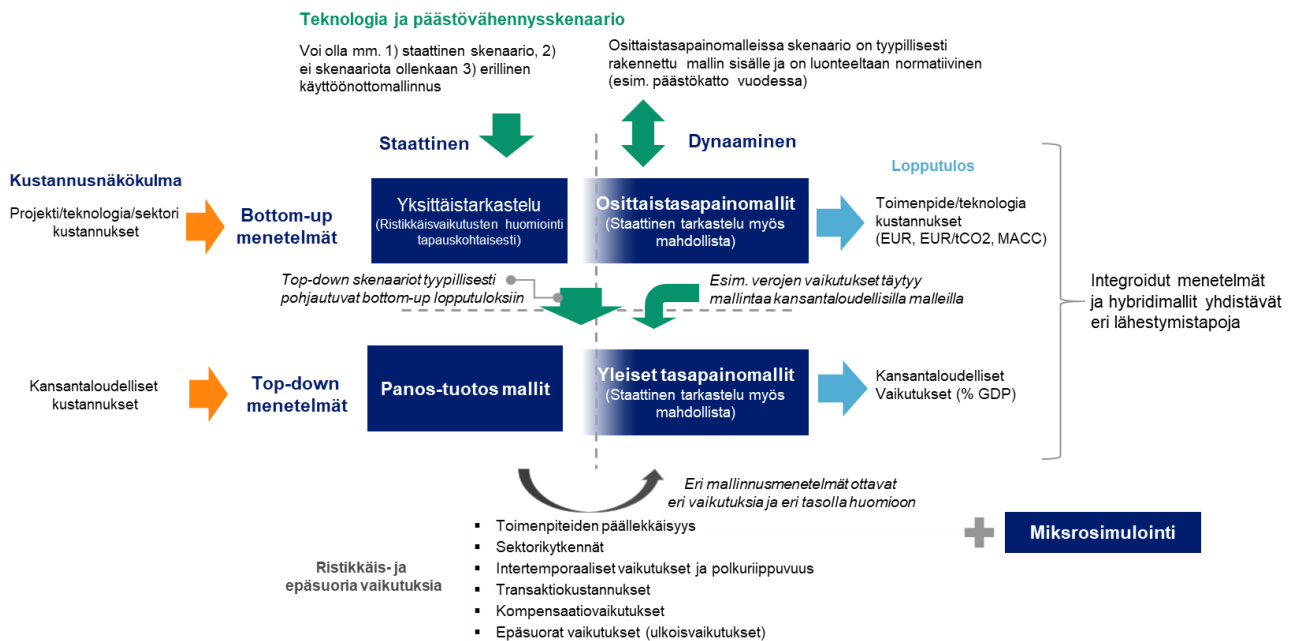
Yllä olevassa kuvassa esitetty kokonaisuus on prosessin omainen (joskaan ei täysin prosessi), jossa eri vaiheet ovat osaltaan linkittyneitä toisiinsa, niin että esim. tavoiteltu kustannusnäkökulma tai arvioinnin kohteena oleva toimenpide vaikuttaa mallinnusmenetelmävalintaan. Alla olevassa kuvassa (Kuva 6-2) on esitetty eri mallinnusmenetelmät ja millä tavalla muut osakokonaisuudet (esitetty yllä: Kuva 6-1) riippuvat valitusta mallinnusmenetelmästä. Keskiössä on neljä eri menetelmää:

- Yksittäistarkastelu, esimerkiksi suoraviivaiset excel-laskelmat
- Osittaitasapainomallit, esimerkiksi TIMES-mallit, jotka laskevat optimaalisen teknologiayhdistelmän tiettyjen rajoitteiden puitteissa, kuten maksimi-CO₂-päästöt vuodessa
- Panos-tuotosmallit
- Yleiset tasapainomallit, esimerkiksi ruotsalainen EMEC-malli

Esitetty jaottelu pohjautuu osittain Söderholm (2012) ja Zhang & Folmer (1998) tunnistamiin kategorioihin ja työssä tehtyihin havaintoihin. Top-down-menetelmiä on muitakin, kuin kuvassa esitetyt, esim. makrokansantaloustieteelliset mallit, mutta näitä ei

juurikaan käytetä päästövähennysten kustannustehokkuuden arviointiin. Laskentamenetelmät voidaan jakaa bottom-up- ja top-down-menetelmiin sekä staattisiin tarkasteluihin ja tasapainotarkasteluihin. Bottom-up-menetelmät ottavat lähtökohdaksi teknologian tai sektorin, kun taas top-down-menetelmät lähtevät eri sektorien kytkennöistä ja kansantaloudellisesta toiminnasta. Yksittäistarkastelu ja osittaistasapainomallit ovat bottom-up-menetelmiä ja panos-tuotosmallit ja yleiset tasapainomallit ovat top-down-menetelmiä. Menetelmät voidaan jakaa myös staattisiin ja dynaamisiin tarkasteluihin. Dynaamisissa tarkasteluissa aikariippuvuus on mallinnettu, kun taas staattisissa tarkasteluissa ei. Osittaistasapainomallit ja yleiset tasapainomallit ovat myös luonteeltaan nimensä mukaisesti tasapainomalleja, eli lopputulos esittää tasapainotilannetta jonkin muuttujan suhteen. Edellä mainittujen lisäksi on olemassa mikrosimulointi lähestymistapa, jossa mallinnetaan hyvin tarkasti yksittäisiä toimijoita.

Kuva 6-2 Kustannustehokkuuden laskentamenetelmien jaottelu



Mallinnuksen tai laskennan lopputulokseen vaikuttaa merkittävästi laskentaan valittava tarkastelutapa eli kustannusnäkökulma, mallinnusmenetelmä ja skenaariot. Bottom-up-menetelmissä arvioidaan projekti-, teknologia- tai sektorikohtaisia kustannuksia ja vastaavasti myös lopputulokset esitetään teknologia- tai toimenpidekustannuksina tai yhden sektorin kustannuksina. Top-down-menetelmissä tarkastellaan kansantaloudellisia vaikutuksia ja siten myös lopputulos on tyypillisesti esim. bruttokansantuotteen muutosvaikutus. Skenaarion muodostaminen riippuu myös valitusta mallin-

nusmenetelmästä. Staattiset menetelmät vaativat staattisia skenaarioita (yksittäistarkastelu tai panos-tuotomallit) ja vastaavasti tasapainomallit mahdollistavat kehittyneemmän skenaariotarkastelun (osittaistasapainomallit tai yleiset tasapainomallit).

Näiden lisäksi eri mallinnusmenetelmät mahdollistavat eri tavalla ristikkäis- ja epäsuorien vaikutusten huomioon ottamisen. Esimerkiksi yksittäisarvioinnissa kaikki lopputulokseen vaikuttavat arvot ovat staattisia lähtöarvoja, kun taas osittaistasapainomalleissa ne voivat olla mallin sisäisiä muuttujia, jolloin jotkin ristikkäisvaikutukset tulevat huomioitua mallin sisällä ”automaattisesti”. Seuraavaksi kuvataan tarkemmin osakokonaisuuksia kuvan 6-1 mukaisesti.

6.1.1 Toimenpidearvioinnin tavoite

Toimenpidearvioinnilla voi olla useita eri tavoitteita, jotka vaikuttavat laskentaan. Tavoitteena voi esimerkiksi olla:

- Vertailla eri toimenpiteiden tai teknologioiden päästövähennysten kustannustehokkuutta,
- Arvioida toimenpiteen kustannusten kohdistumista eri toimijoille (valtiolle, kuluttajalle ym.),
- Arvioida laajemman toimenpidepaketin kansantaloudellisia vaikutuksia tai
- Auttaa ohjauskeinon suunnittelussa.

Arviointi voi tapahtua sekä ennen mahdollisen poliittisen ohjauskeinon käyttöönottoa (ex-ante) tai sen jälkeen (ex-post). Tyypillisesti arviointeja tehdään ennen mahdollisen ohjauskeinon käyttöönottoa (ex-ante) ja niiden tavoitteena on tuottaa poliittisille päättäjille tietoa tavoitteiden asettamiseksi tai ohjauskeinojen suunnitteluun, mutta kirjallisuudesta löytyy myös esimerkkejä käyttöönoton jälkeisistä (ex-post) arvioinneista mm. WSP (2017).

Tässä työssä keskitytään pääsääntöisesti kustannustehokkuusarviointeihin, eli niihin arviointeihin, joissa on arvioitu kustannusten ja niillä saavutetun päästövähennemän suhdetta. Työssä tuodaan osittain esiin myös muunlaisia arviointeja.

6.1.2 Tarkastelujakson valinta

Toimenpidetavoitteiden päästövähennysten laskentaan vaikuttaa merkittävästi myös tarkastelujakson pituuden valinta. Arvioinnissa voidaan tarkastella saavutettuja päästövähennyksiä tietyssä vuonna, esim. KAISUn tapauksessa vuonna 2030. Saavutetut

päästövähennemät ilmaistaan tyypillisesti muodossa x tonnia CO₂e vähemmän päästöjä kyseisenä vuotena suhteessa perusuraan tai referenssvuoteen. Vaihtoehtoisesti voidaan myös tarkastella kumulatiivisia päästövähennyksiä, kuten on tehty PwC:n (2016) selvityksessä Saksassa, tai tarkastella nykyhetkellä tarjolla olevia päästövähennystoimia ja niiden kustannustehokkuutta kuten Eory ym. (2015) selvityksessä.

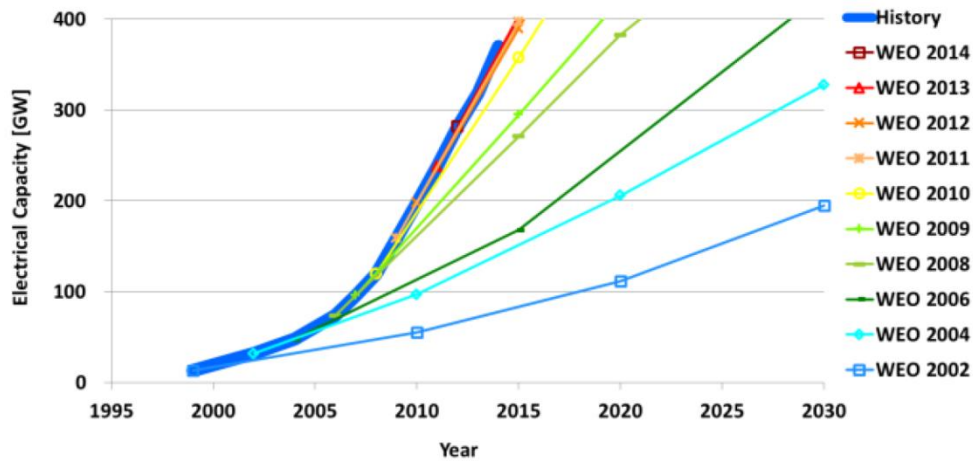
6.1.3 Perusuran valinta

Perusura (baseline) edustaa arviota kehityksestä ilman analysoitavia päästövähennystoimenpiteitä. Ne ovat tyypillisesti ns. business-as-usual-skenaarioita, eli esimerkiksi arviota siitä, millä tavalla liikennesektori ja henkilöautojen määrä kehittyisi, ellei päästövähennystoimenpiteitä toteuteta. Laskennassa muodostetaan vastaskenaario, jossa on oletettu valikoitujen toimenpiteiden toteutuminen. Vertaamalla päästövähennystoimenpideskenaariota perusuraan arvioidaan päästövähennystoimenpiteiden aiheuttamia vähennyksiä ja kustannustehokkuutta.

Perusuran muodostamiseen liittyy huomattavia epävarmuustekijöitä etenkin taustaoletuksista johtuen. Sektorista riippuen perusuran taustalla on oltava oletuksia mm. talouskehityksestä ja polttoaineiden maailmanmarkkinahinnoista. Lisäksi täytyy muodostaa näkemys teknologian kehityksestä ja nykyisen politiikan vaikutuksista, joihin molempiin liittyy epävarmuuksia. Etenkin teknologiakeskeisillä sektoreilla, kuten liikennesektorilla, teknologinen kehitys aiheuttaa huomattavia epävarmuuksia perusuran muodostamiselle (ja päästövähennyskenaarioille). Oletuksia joudutaan tekemään sekä nykyisen teknologian kehitykselle, että vaihtoehtoisten teknologioiden kehitykselle. Esimerkiksi samaan aikaan kun sähköautojen kehitys etenee, alenevat myös perinteisiä käyttövoimia edustavien ajoneuvojen polttoainekulutus ja päästöt. Tehdyt oletukset voivat vaikuttaa huomattavasti sekä saavutettaviin päästövähennyksiin että niiden kustannuksiin.

Yksi esimerkki perusuran kehitysoletuksien epävarmuudesta löytyy energiasektorilta: IEA on vuosittain vuodesta 2002 lähtien päivittänyt tuulivoiman kapasiteettikehitysnusteita ylöspäin, koska kehitys on ollut huomattavasti aikaisempia projektioita nopeampaa jopa lyhyellä aikavälillä (Kuva 6-3). Aikaisemmat ennusteet ovat olettaneet lineaarisesta kasvua tulevaisuudessa, mutta todellisuudessa kasvu on ollut eksponentiaalista (EWG, 2015). Nopeampi kasvu johtunee teknologian kehityksen ja politiikkatoimien (jotka osaltaan vaikuttavat teknologian kehitykseen) nopeammasta muutoksesta.

Kuva 6-3 IEA:n ennusteet tuulivoiman kapasiteetin kehitykselle eri vuosina (EWG, 2015)



Ongelmaksi muutokset perusuran taustaoletuksissa muodostuvat silloin, jos perusuraa ei päivitetä riittävän usein. Tällöin käytössä oleva perusura ei enää edusta parasta näkemystä kehityksestä ja päästövähennystoimenpiteiden arviointi tuottaa lähtökohtaisesti vääriä tuloksia.

Perusurat vaihtelevat sektoreittain, ja jos eri sektorien toimenpiteitä halutaan vertailla keskenään, täytyy myös perusurien olla taustoiltaan yhteneväisiä relevanteilta osilta kuten talouskehityksen osalta. Joissakin tapauksissa referenssitasona voidaan käyttää myös tietyn referenssivuoden lähtötasoa (esimerkiksi EU:n ilmastotavoitteiden vertailuvuosi on 1990).

Perusurien luomisessa on huomioitava lukuisia eri tekijöitä. Mm. Clapp ja Praig (2012) ovat kuvanneet kattavasti perusuran kehittämiseen liittyviä hyviä käytäntöjä, jotka on koottu seuraavaan taulukkoon (Taulukko 6-1).

Taulukko 6-1 Perusuran elementtien hyvät käytännöt (Clapp & Prag, 2012)

Osa-alue	Arviointiprosessi ja huomioitavia näkökulmia
Sidosryhmien hyödyntäminen	<ul style="list-style-type: none"> Eri sidosryhmillä on eri tavoitteet ja näkökulmat. Oleellisia sidosryhmiä ovat mm. teollisuus, yritykset, yliopistot, kansalaisjärjestöt, hallitus, poliitikot. Monipuolinen osallistaminen johtaa realistisempaan skenaariokehitykseen sekä sitouttaa eri sidosryhmiä skenaarion tavoitteisiin.
Päästö-inventaario	<ul style="list-style-type: none"> Tavoitteena on kattava ja tarkka esitys eri päästölähteistä ja hiilinieluista. Aiemmat inventaariot sekä päästökahtely voivat antaa hyvän lähtökohdan päästöinventaarion toteuttamiselle. Päästöinventaarion toteuttamiseksi tarvitaan toimintaa koskevat päästötiedot ja -kertoimet, joiden avulla kokonaispäästöt voidaan määrittää.

Osa-alue	Arviointiprosessi ja huomioitavia näkökulmia
	<ul style="list-style-type: none"> • Laadukas tieto mahdollistaa tarkan inventaarion ja luotettavan ennusteen muodostamisen. Systemaattisen ja laadukkaan tiedonkeruun puute on haaste erityisesti kehittyvissä maissa. • Päästöinventaarion tulee noudattaa IPCC:n raportointiohjeistusta.
Aloitusvuosi ja aikajänne	<ul style="list-style-type: none"> • Skenaariokehitys voidaan perustaa yhden tai useamman vuoden ajalta kerättyyn dataan. • Mikäli skenaario määritellään perustuen ainoastaan yhden vuoden tietoihin, ei voida analysoida historiatrendejä, minkä seurauksena skenaarion luotettavuus on todennäköisesti heikompi. • Tällä hetkellä ei ole yleisesti sovittua, standardoitua vuotta, johon skenaariokehitys tulee perustaa.
Laajuus	<ul style="list-style-type: none"> • Kaikkia kansallisia päästöjä ei ole realistista laskea, minkä vuoksi tulee keskittyä päästöjen kannalta olennaisimpiin toimialoihin ja päästölähteisiin.
Tavoitteiden määrittely	<ul style="list-style-type: none"> • Ennusteet perustuvat tärkeimpien päästöajureiden kehittymiseen tulevaisuudessa. Tämän vuoksi tärkeimpien sektoreiden pääajurit ja niiden kehittyminen tulevaisuudessa tulee määrittää. • Jos maalla ei ole paikallista alkutietoja, voi se hyödyntää kansainvälisten organisaatioiden tietokantoja. Jos maa hyödyntää paikallisia tietokantoja, voi oletusten vertailtavuus keskenään muodostua haasteelliseksi.
Sisäpoliittisten toimenpiteiden käsittely	<ul style="list-style-type: none"> • Useat poliittiset toimenpiteet vaikuttavat kasviuonekaasupäästöihin, minkä vuoksi nykyiset ja odotettavissa olevat poliittiset linjaukset on pyrittävä huomioimaan skenaariomallinnuksessa. • On tärkeää ymmärtää, mitkä poliittiset linjaukset on huomioitu lähtötilanteen määrittämisessä, jotta erilaisia tilanteita voidaan verrata. • UNFCCC:n päästöennusteohjeistus ei määrittele, millaiset poliittiset linjaukset voidaan huomioida ennusteissa. Eräs tapa on arvioida vaikutuksia jo hyväksytyjen ja tulevaisuudessa todennäköisten linjausten pohjalta.
Mallinnuksen pääperiaatteet	<ul style="list-style-type: none"> • Mallinnus voidaan toteuttaa ekstrapoloimalla suoraan historiallisia päästötrendejä ja kerättyjä tietoja, tai suorittamalla monimutkainen mallinnusprosessi. Lisäksi mallinnuksen jaottelu voi olla toteutettu maatasolla tai sektoreittain. Mallinnustavan valinnalla on huomattava vaikutus alkuarvoihin ja arvioituun päästövähennyspotentiaaliin. • Mallinnus edellyttää oletuksia tärkeimmistä muuttujista ja pääajureista. • Pääajureihin liittyvät oletukset voivat määrittää, kuinka monimutkainen mallinnus on tarpeellista. Esimerkiksi, jos ajureiden oletetaan pysyvän ennallaan, voi yksinkertainen mallinnus olla toimiva. • Johtuen useista erilaisista menetelmistä, kansainvälisen ymmärryksen säilyttämiseksi tulee mallinnus olla raportoitu yksiselitteisesti ja läpinäkyvästi.
Herkkyysanalyysi	<ul style="list-style-type: none"> • Ennusteet eivät ole koskaan tarkkoja, mitä voidaan kompensoida mallintamalla useita eri päästöskenaarioita, joiden erot perustuvat muutoksiin pääajureissa. • Skenaariotarkastelu voi paljastaa mallin herkkyyden erilaisille ajureille. • Tämä parantaa ymmärrystä päästöjen kehittymisestä ja mahdollistaa kansainvälisen ymmärryksen muodostumisen siitä, miksi jotakin jotakin menetelmää on hyödynnetty.
Alku-skenaarioiden arviointi	<ul style="list-style-type: none"> • Cancunin sopimuksen nojalla kehittyneiden maiden päästövähennystavoitteet ovat IAR:n (International Assessment and Review) alaisia, kun taas kehittyvien maiden vähennystoimia käy läpi ICA (International Consultations and Analysis). • IAR ei keskity lähtöarvoihin, mutta heidän prosessinsa sisältää päästöennusteiden lyhyen arvioinnin. ICA ei myöskään tee lähtöennusteiden arviointia. • Lähtöarvojen arviointiin voisi sisältyä asiantuntijoiden tekninen vertaisarviointi tai UNFCCC:n yhteydessä käynnistetty muodollisempi lähestymistapa.

Osa-alue	Arviointiprosessi ja huomioitavia näkökulmia
Lähtöennusteiden päivittäminen	<ul style="list-style-type: none"> Taloudelliset ja muut olosuhteet muuttuvat ajan kuluessa, minkä vuoksi ennusteita tulee päivittää. Päivittämisen ajankohdan määrittäminen ei ole kuitenkaan yksiselitteistä. Päivitykset tulisi suorittaa niin, etteivät lähtöarvot olisi liian riippuvaisia taloudellisista sykleistä. Tästä syystä ajankohtaisimman tiedon hyödyntäminen ei ole aina järkevintä. Ennusteita ei ole välttämättä hyvä päivittää ennalta sovituin väliajoin, sillä näin merkittäviä muutoksia ei aina voida huomioida mallinnuksessa järkevästi, mikä mahdollistaa ennusteiden vääristymisen. Tätä vastoin lähtöarvoja kannattaa päivittää silloin kuin jokin pääajureista muuttuu tietyn verran suhteessa alkuperäisessä skenaariossa hyödynnettyihin arvoihin. Lopuksi on tärkeää selvittää, miten näiden pääajureiden muutokset vaikuttavat päästöihin.

Perusurat ovat tyypillisesti ns. business-as-usual-skenaarioita, eivätkä ne siksi ota huomioon ilmastonmuutoksen aiheuttamia lisäkustannuksia tilanteessa, jossa päästövähennystoimenpiteitä ei toteutettaisi. Business-as-usual edustaa nykytilanteen jatkumista pitkälle tulevaisuuteen, kun todellisuudessa ilmastonmuutos voi aiheuttaa huomattavia kustannuksia suhteessa nykytilanteeseen. Asiasta on tehty suhteellisen vähän kattavia selvityksiä, mutta Lipinski & Heather (2010) on koostanut seitsemän eri selvityksen arviot ilmastonmuutoksen sopeutumiskustannuksista kehittyvässä maissa. Arviot vaihtelevat suhteellisen pienistä summista aina 100 miljardiin euroon vuosittain. Tuoreemman (Olhoff ym. 2016) selvityksen mukaan kehittyvässä maissa ilmastonmuutoksen kustannukset voivat nousta jopa 500 miljardiin euroon vuosittain. Arviot sisältävät huomattavia epävarmuuksia ja ne keskittyvät kehittyviin maihin. Ne kuitenkin osoittavat, että ilmastonmuutoksen aiheuttamat sään ääri-ilmiöt ja muut kielteiset vaikutukset aiheuttavat todennäköisesti huomattavia lisäkustannuksia. Lisäkustannukset ovat todennäköisiä myös kehittyneissä maissa ja ne tekevät päästövähennystoimenpiteistä todennäköisesti kannattavampia.

Hiilidioksidipäästöjen sosiaalinen kustannus (social cost of carbon) ja hiilidioksidipäästöjen varjohinta (shadow price of carbon) ovat molemmat konsepteja, joilla hiilidioksidipäästöjen ulkoiskustannuksia, eli pitkän aikavälin vaikutuksia on pyritty kvantifioimaan. Hiilidioksidipäästöjen sosiaalinen kustannus kuvaa sen aiheuttaman vahingon marginaalista kustannusta päätyessä ilmakehään yksikössä [kustannus]/tCO₂. Se kertoo kuinka paljon teoriassa yhteiskunnan pitäisi olla valmis maksamaan päästövähennyksistä, koska jos päästövähennystoimien kustannus on alle hiilidioksidipäästön sosiaalisen kustannuksen, toimen pitäisi olla pitkällä aikavälillä kannattava. Hiilidioksidipäästöjen varjohinta on samankaltainen käsite kuin sosiaalinen kustannus, mutta siinä voidaan ottaa huomioon myös poliittiset ja teknologiset olosuhteet. (Richard ym., 2007)

Hiilidioksidin varjohintaa käytetään Iso-Britanniassa politiikkatoimenpiteiden arviointiin ja siellä käytetyt hinnat ovat saatavilla julkisesti lähteestä ”The Green Book” (Gov.uk,

2019). Myös Ruotsissa on tehty selvityksiä hiilidioksidin sosiaalisesta kustannuksesta (mm. Trafikverket, 2018).

6.1.4 Skenaariot

Päästövähennyksiä suhteessa perusuraan lasketaan tyypillisesti skenaariotarkastelun avulla. Skenaario edustaa vaihtoehtoista tai mahdollista kehityssuuntaa teknologian kehitykselle, menetelmille tai taloudelliselle toiminnalle. Perusura on myös yksi skenaario mahdolliselle kehitykselle. Eräs jaottelu skenaarioille on: 1) prediktiiviset, 2) eksploraatiiviset ja 3) normatiiviset skenaariot. Prediktiivinen skenaario on luonteeltaan ennustava ja vastaa kysymykseen ”mitä tulee tapahtumaan?”. Perusurat ja business-as-usual-skenaariot ovat yleensä tämän kaltaisia. Eksploraatiiviset skenaariot vastaavat kysymykseen ”mitä voi tapahtua?” ja normatiiviset skenaariot vastaavat kysymykseen ”mitä pitäisi tapahtua?” eli miten valitut tavoitteet voidaan saavuttaa. Päästövähennystarkastelut ovat usein normatiivisia. Toisin sanoen niissä asetetaan tietty päästötavoite tietylle vuodelle tai vuosille ja mallinnuksen tai analyysin kautta arvioidaan, millä toimenpiteillä tai teknologioilla päästään haluttuun päästövähennyslopputulokseen.

Vaihtoehtoisia menetelmiä tarkastella päästövähennystoimenpiteitä on mm. tarkastella valituilla toimenpiteillä saavutettavaa kokonaispäästövähennyspotentiaalia ja siihen liittyviä kustannuksia joko nykyhetkellä tai valittuna vuonna. Vaihtoehtoisesti voidaan laskea käänteisesti, kuinka paljon kustannukset kasvavat, jos esimerkiksi tietty määrä polttomootoriautoja korvataan sähköautoilla uusmyynnissä.

Ristikkäis- ja epäsuorat vaikutukset

Erilaiset ristikkäis- ja epäsuorat vaikutukset eivät varsinaisesti ole analyysin osakokonaisuus, mutta ne luovat taustadynamiikan, joka täytyy ottaa laskennassa huomioon. Erilaiset ristikkäisvaikutukset voivat ohjata myös mallinnusmenetelmän valintaa, koska eri mallinnusmenetelmillä voidaan huomioida eri vaikutuksia eritasoisesti.

Erilaiset ristikkäisvaikutukset tekevät päästövähennysten kustannustehokkuuden laskennasta haasteellista. Ristikkäisvaikutuksia on monella eri tasolla: eri toimenpiteillä voi olla keskenään risteäviä vaikutuksia ja toisaalta itse mallinnettavien sektorien sisällä ja sektorien välillä voi olla lukuisia vaikutuksia, jotka vaikuttavat toimenpiteisiin. Ristikkäis- ja epäsuorat vaikutukset voivat tapahtua sekä päästövähennys- että kustannustasolla. Työssä on tunnistettu lukuisia vaikutuksia, joita on listattu taulukossa alla (Taulukko 6-2). Listauksessa on pyritty olemaan mahdollisimman kattavia, mutta osa ristikkäisvaikutuksista voi silti puuttua taulukosta.

Taulukko 6-2 Työssä tunnistettuja ristikkäis- ja epäsuoria vaikutuksia

Vaikutuksen tyyppi	Kuvaus
Toimenpiteiden päällekkäisyys	<ul style="list-style-type: none"> Eri toimenpiteillä voi olla toistensa kanssa päällekkäisiä vaikutuksia, kun ne esimerkiksi tähtäävät saman päästölähteen pienentämiseen.
Sektorikytkennät	<ul style="list-style-type: none"> Sektorikytkentöjä syntyy, kun teknologiat tai toimenpiteet vaikuttavat useampaan eri sektoriin samanaikaisesti, ja muutokset yhdellä sektorilla vaikuttavat myös toiseen sektoriin. Joissain tapauksissa kytkentä on molemminpuolinen siten, että molemmat sektorit (tai teknologiat molemmilla sektoreilla) vaikuttavat toisiinsa samanaikaisesti. Esimerkki sektorikytkennästä ovat sähköautot. Sähköautojen päästöt riippuvat vahvasti sähköntuotannon päästökertoimesta ja samanaikaisesti nostavat sähkön kysyntää, mikä puolestaan voi vaikuttaa päästökertoimeen ja myös sähkön markkinahintaan. Toimenpiteestä voi myös syntyä päästövähennyksiä toiselle sektorille. Tästä syntyy allokaatio-ongelma tarkastelussa, eli pohditaan sitä, mille sektorille päästövähennys lasketaan. Vaihtoehtona on allokoida päästövähennys sektorille, jossa toimenpide toteutetaan, tai sektorille, jossa itse päästövähennykset syntyvät (vrt. maataloussektorilla tuotettu ja liikennekäytössä hyödynnettävä biokaasu).
Intertemporaaliset vaikutukset ja polkuriippuvuus	<ul style="list-style-type: none"> Aiemmat valinnat vaikuttavat tulevaisuuden valintamahdollisuuksiin niin, että nykytilanteessa tehdyt päätökset joko rajaavat tai mahdollistavat tiettyjä valintoja tulevaisuudessa. Verkostovaikutukset ovat esimerkki polkuriippuvuuksista. Liikennesektorilla ajoneuvoteknologiat ovat vahvasti riippuvaisia niistä tukevasta infrastruktuurista, mikä tarkoittaa, että infrastruktuurin ja teknologian yleistyessä niistä tulee entistä houkuttelevampia. Tämä ohjaa enemmän kuluttajia kohti teknologiaa, ja johtaa lopputulokseen, jossa on yksi dominoiva teknologia ja vaihtaminen vaihtoehtoihin on vaikeaa. Intertemporaalisilla vaikutuksilla voidaan tarkoittaa myös yleisemmin tilanteita, joissa nykyhetkessä tehdyt päätökset vaikuttavat tulevaisuuden tilanteisiin. Esim. kalliiseen teknologiaan keskittyminen ja sen edistäminen voivat laskea teknologiakustannuksia tulevaisuudessa. Valinnoista voi aiheuttua "lock-in"-ilmiöitä, esim. kaasuturbiinien käyttö energiasektorilla voi vaikuttaa hyvältä väliratkaisulta siirryttäessä kohti päästövapaata energiantuotantoa. Pitkäikäisten investointien tapauksessa voidaan kuitenkin päätyä kymmenien vuosien kuluessa tilanteeseen, jossa lisäpäästövähennyksien saavuttaminen on vaikeaa, koska järjestelmässä on huomattava määrä kaasuvoimalaitoksia.
Transaktio-kustannukset ja epäsuorat kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Transaktiokustannukset tarkoittavat niitä kustannuksia, joita syntyy toimenpiteiden toteuttamisesta tai yksilöiden toiminnasta. Transaktiokustannuksia ovat esimerkiksi rahoituskorko, jos tuote ostetaan lainarahalla, tai ajan menetys, jonka henkilöt käyttävät eri vaihtoehtojen vertailuun. Epäsuoria (tai piilo-)kustannuksia puolestaan ovat esim. ylimääräinen ajankäyttö, jos uusi teknologia sitä vaatii. Esim. maalämpöpumppujen kohdalla tiedonhaku ennen investointipäätöstä, menetetyt tilan kustannukset, jne.
Kompensaatio-vaikutukset (rebound effect)	<ul style="list-style-type: none"> Kompensaatiovaikutuksia on sekä suoria että epäsuoria. Esimerkiksi energiatehokkuustoimet voivat säästää kustannuksissa (suora kompensaatiovaikutus), jolloin säästetyillä euroilla kulutetaan enemmän samaa energiaa, jota säästettiin (esim. säädetään lämmitystä suuremmalle). Esimerkki

Vaikutuksen tyyppi	Kuvaus
	epäsuorista kompensatiovaikutuksista on, että säästetyillä euroilla kulutetaan muita päästöjä aiheuttavia hyödykkeitä, kuten lisätään yksityisautoilua.
Epäsuorat vaikutukset (ulkoisvaikutus.)	<ul style="list-style-type: none"> Epäsuoria vaikutuksia voivat olla esimerkiksi vaikutukset työllisyyteen ja vaihtotaseeseen, kun tuetaan sektoreita tai teknologioita, jotka synnyttävät työpaikkoja valtion sisälle. Kysynnän elastisuus on myös esimerkki epäsuorista vaikutuksista. Esimerkiksi kysyntä yksityisautoilulle kasvaa hinnan laskiessa ja päinvastoin.

6.1.5 Mallinnusmenetelmät

Itse päästövähennystoimenpiteiden kustannusten mallintamiseen on muutama eri menetelmä. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 6-3) on kuvattu eri menetelmien ominaisuuksia. Menetelmälistaus pohjautuu Zhangin ja Folmerin (1998) tekemään selvitykseen. Selvityksessä tunnistettiin viisi eri menetelmää: ad hoc -lähestymistapa, dynaaminen simulointi, panos-tuotosmallit, yleiset tasapainomallit (YTP) ja hybridimenetelmät. Tässä työssä eri menetelmät on nimetty hieman eri tavalla. Ad hoc -menetelmästä käytetään nimitystä yksittäistarkastelu, johon liittyen on erikseen erotettu tapauskohtainen interaktioiden huomiointi. Dynaamisesta simuloinnista puhutaan osittaistasapainomalleina ja hybridimenetelmistä käytetään nimitystä integroidut menetelmät.

Pääsääntöinen ero eri mallinnusmenetelmien välillä on, kuinka hyvin ne ottavat huomioon eri ristikkäis- ja epäsuoria vaikutuksia ja mitkä muuttujat ovat mallinnuksessa eksogeenisiä ja mitkä endogeenisiä. Eksogeeniset muuttujat otetaan malliin ulkopuolelta annettuina vakioina. Endogeeniset muuttujat ovat puolestaan sellaisia muuttujia, jotka malli yrittää ratkaista. Yksittäistarkastelussa lähes kaikki muuttujat ovat eksogeenisiä ja vastaavasti osittaistasapainomalleissa ja yleisissä tasapainomalleissa endogeenisten muuttujien määrä kasvaa.

Taulukko 6-3 Päästövähennystoimenpiteiden kustannusten mallinnusmenetelmät

Menetelmä	Kuvaus
Yksittäistarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Toimenpiteiden kustannustehokkuus ja mahdolliset muut vaikutukset arvioidaan yksittäin suoraviivaisella laskennalla. Tyypillisesti esim. investoilaskelma tyyppinen. Toimenpiteiden välisiä interaktioita ei huomioida. Staatinn tarkastelu, tehty yleensä teknologia tai projekti näkökulmasta Tapauskohtaisesti yksittäisten toimenpiteiden kohdalla huomioidaan myös eri toimenpiteiden ja sektorien väliset riippuvuudet.
Osittaistasapainomallit	<ul style="list-style-type: none"> Kattaa rajallisen sektorin toiminnan, esim. energijärjestelmämallit. Osittaistasapainomallit minimoivat yhden sektorin kustannuksia, olettaen tietyt lähtöoletukset kuten CO₂-päästöraja vuodelle.

Menetelmä	Kuvaus
	<ul style="list-style-type: none"> • Tyypillisesti teknologiamalleja: mallissa kuvattu useiden teknologioiden tai toimenpiteiden kustannustekijöitä ja päästövaikutuksia ja malli ratkaisee kustannustehokkaimman kokonaisuuden • Sektorin ulkopuoliset muuttujat ovat eksogeenisiä.
Panos-tuotomallit	<ul style="list-style-type: none"> • Lineaarinen malli, jossa eri sektorien kytkennät ja riippuvuudet malinnettu tilastollisiin lukuihin perustuen • Talous on jaettu useisiin toimialoihin, sektorien riippuvuudet kuvaavat hyödykevirtoja sektorien välillä • Ovat luonteeltaan staattisia siinä mielessä, että sektorikytkennät ovat eksogeenisiä muuttujia
Yleiset tasapainomallit	<ul style="list-style-type: none"> • Perustuvat kansantaloustieteen perusteihin: malli pyrkii löytämään kysynnän ja tarjonnan tasapainotilanteen • Soveltuu hyvin eri toimenpidepakettien kansantaloudelliset vaikutusten kokonaisarviointiin • Toisin kuin pano-tuotos mallit, YTP mallit ottavat paremmin huomioon erilaisia epäsuoria vaikutuksia, kuten kysynnän jousto ja substituutio vaikutukset
Integroidut menetelmät	<ul style="list-style-type: none"> • Yhdistetään useampia eri mallinnusmenetelmiä, esim. sektoraaliset kehitykset osittaistasapainomalleilla ja kansantaloudelliset vaikutukset yleisillä tasapainomalleilla.

6.1.6 Kustannusnäkökulma

IPCC WG III (2001) tunnistaa kolme eri analyysirajausta, jotka samalla rajaavat kustannustarkastelua: 1) projektitaso, 2) sektoritaso ja 3) kansantaloustaso. Projektitason analyyseissa arvioidaan irrallisia investointeja tai toimenpiteitä vähäpäästöiseen teknologiaan tai menetelmiin. Projektitason tarkastelu voidaan laajentaa tarkoittamaan myös teknologiatason tarkastelua, joka on esimerkiksi tarkastelu eri lämmitysteknologioiden kustannustehokkuudesta tietyillä lähtöoletuksilla. Tämänkaltainen tarkastelu on tyypillisesti staattista. Sektoritason tarkastelu vaatii osittaistasapainomallien käyttöä, ja siinä tapauksessa tarkastelun kohteena on yksi tai useampi sektori, jonka kustannuksia arvioidaan olettamalla sektorien ulkopuoliset muuttujat eksogeenisiksi. Viimeisessä vaihtoehdossa, kansantaloustason tarkasteluissa, lasketaan kustannuksia koko kansantaloustasolla. Tämänkaltaisia tarkasteluja tehdään YTP-malleille.

Kustannusten kohdentuminen on myös relevantti näkökulma. Toimenpiteistä voi aiheutua erilaisia kustannuksia eri toimijoille. Esimerkiksi vähäpäästöisten teknologioiden käyttöönottoon liittyvät kustannukset kohdistuvat tyypillisesti yksityisille toimijoille. Myös verotukselliset toimenpiteet vaikuttavat suoraan yksittäisten toimijoiden hyödykkeistä maksamiin hintoihin, mutta myös valtioon verotulojen muutosten muodossa. Verot vaikuttavat myös suoraan verotettavien tuotteiden myyjiin muuttamalla tuotteiden kysyntää. Käyttäjien lisäksi kustannuksia tai tuloja voi kohdentua myös tietyille sektoreille. Kustannusten kohdentuminen on tärkeä näkökulma varsinkin suunniteltaessa ohjauskeinoja.

Diskonttauskorot

Diskonttauskorolla tarkoitetaan korkoa, jolla päästövähennystoimien kustannukset tuodaan nykypäivään, eli sillä lasketaan tulevaisuuden kustannusten nykyarvoa. Diskonttauksen taustalla on ajatus, että tulevaisuudessa syntyvä kustannus on arvoltaan pienempi kuin vastaava kustannus nykypäivänä. Päästövähennyslaskennassa tyypillisesti käytetään kahta eri korkoa ja koron käsitettä: yksityinen diskonttauskorko ja sosiaalinen diskonttauskorko ja ne kuvaavat eri toimijoiden päätöksentekoa. Yksityinen diskonttauskorko on huomattavasti korkeampi, tyypillisesti suuruusluokkaa 7–10 %, mikä tarkoittaa, että laskennassa painotetaan lyhyen aikavälin kustannuksia. Vastaavasti sosiaalinen diskonttauskorko on alhaisempi, tyypillisesti tasolla 3,5 % tai tämän läheisyydessä, mikä painottaa pidemmän aikavälin kustannuksia. Diskonttauskorko voi myös laskea ajan mukana, niin että se tietyn vuoden jälkeen laskee alemmalle tasolle. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa käytetään yleisesti diskonttauskorkona 3,5 % (yli 30 vuoden laskennoissa suositellaan diskonttauskoron pienentämistä 30 laskenta vuoden jälkeen), mikä on valtiovarainministeriön julkaiseman arviointiohjeen mukainen. Diskonttauskorko on määritetty aikapreferenssin sekä omaisuuden kasvun summana ("The Green Book", HM Treasury 2018). McKinsey on käyttänyt Suomessa tehdyssä selvityksessä 4 % korkoa ja Saksan ilmastostrategian taustaselvityksessä on käytetty diskonttauskorkoa 1,5 %, mikä on alle UBA (2012) suositteleman 3 % alle 20 vuoden laskennoissa ja pienempi pidemmissä laskennoissa.

Ero yksityisen ja sosiaalisen diskonttauskoron välillä kuvastaa yksityisten toimijoiden lyhyempää tarkasteluajanjaksoa, eli yksityiset toimijat ovat kiinnostuneempia lyhyen aikavälin kustannuksista. Vastaavasti yhteiskunnallisella tasolla voidaan tarkastella hyötyjä ja kustannuksia pidemmältä ajanjaksolta. Laskennallisesti tämä tarkoittaa sitä, että pienemmällä diskonttauskorolla tulevaisuuden kustannukset painottuvat enemmän, kun taas korkeammalla diskonttauskorolla lähiajan kustannukset painottuvat enemmän. Tämä korostuu etenkin pitkän ajan vaikutuksen omaavien toimien, kuten metsityksen, kohdalla. Tämä pätee myös mahdollisten ilmastonmuutoksen kustannusten diskonttaukseseen: suuremmalla diskonttauskorolla tulevaisuudessa syntyvät kustannukset saavat pienemmän painoarvon.

Erilaisten diskonttauskorkojen käyttö aiheuttaa päästövähennysten kustannustehokkuusarviointeihin ja ennen kaikkea niiden perusteella tehtyihin toimenpiteisiin epävarmuutta. Yleisessä tarkastelussa on monesti perusteltua käyttää sosiaalista diskonttauskorkoa, koska tulevaisuuden hyödyt ovat yhteiskunnan näkökulmasta myös hyvin tärkeitä. Toimenpiteiden toteuttajat ovat kuitenkin tyypillisesti yksityisiä osapuolia, jotka diskonttaavat kustannuksia korkeammalla korolla, jolloin alemmalla korolla kustannustehokkaiksi arvioidut toimenpiteet eivät välttämättä tapahdu. Tässä mielessä sosiaalinen diskonttauskorko edustaa korkoa, jolla yhteiskunnan pitäisi arvottaa pääs-

tövähennyksiä ja yksityinen diskonttaus korko edustaa sitä korkoa, jolla yksityiset toimijat tekevät todellisuudessa päätöksiä. Tämä saattaa johtaa käytännössä siihen, että yhteiskunnan näkökulmasta kannattavat hankkeet eivät toteudu, koska yksityiset toimijat odottavat investoinneille korkeampaa tuottoa.

Laskennoissa diskontataan tyypillisesti vain kustannuksia, mikä tarkoittaa, että vain kustannuksilla oletetaan olevan aika-arvoa. Ilmastonmuutoksen näkökulmasta herää kuitenkin kysymys, täytyisikö myös päästövähennyksiä diskontata. Myös päästövähennyksillä voidaan nähdä aika-arvo siten, että tänään saavutettu päästövähennys on arvokkaampi kuin esim. kymmenen vuoden päästä saavutettu päästövähennys.

6.1.7 Kustannustehokkuuden määrittäminen

Kustannustehokkuuden analyysin tuloksia voidaan esittää useassa eri muodossa. Yleisimmät esitystavat on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 6-4). Eri esitystavat liittyvät vahvasti valittuun mallinnusmenetelmään, sillä käytetty mallinnusmenetelmä asettaa rajoituksia mahdollisille esitystavoille.

Taulukko 6-4 Kustannustehokkuusarvioinnin eri esitystapoja

Esitystapa		
EUR/tCO ₂ e	<ul style="list-style-type: none"> Yksittäisten toimenpiteiden EUR/tCO₂e kustannus 	
	+	-
	<ul style="list-style-type: none"> Suoraviivainen esitystapa 	<ul style="list-style-type: none"> Voivat hämärtää tulosten todellista vertailukelpoisuutta Päästövähennykseen vaaditaan usein joka tapauksessa useampi toimenpide, jotka täytyy huomioida arvioinnissa
MAC-käyrät	<ul style="list-style-type: none"> MAC-käyrät (Marginal Abatement Cost, eli marginaalipäästövähennyskustannus) – esitetään päästövähennystoimenpiteet kustannuspotentiaalikuvaajalla (esimerkkinä Kuva 6-4). X-akseli kuvaa päästövähennyspotentiaalia, tyypillisesti tietynä tarkasteluvuonna suhteessa lähtövuoteen, ja y-akseli kuvaa kustannusta EUR/tCO₂e yksikössä 	
	+	-
	<ul style="list-style-type: none"> Mahdollistaa toimenpiteiden vertailun Visuaalisesti selkeä kuvaus ja CO₂ mukana tarkastelussa Hyödyllinen, jos huomattava määrä tarkasteltavia vaihtoehtoja 	<ul style="list-style-type: none"> Katso tarkemmin ”MAC-käyrien rajoitukset” -osio alla
% BKT	<ul style="list-style-type: none"> Toimenpidepaketin kustannukset esitetään prosentteina bruttokansantuotteeseen Negatiivinen luku kuvaa sitä, että toimenpiteillä on BKT:ta laskeva vaikutus, eli kokonaiskustannukset ovat negatiivisia. Positiivinen luku kuvaa sitä, että toimilla on positiivinen vaikutus Tulokset esitetään tyypillisesti koko toimenpidepaketille (esimerkiksi ohjelma, suunnitelma tai strategia), ei yksittäisille toimille 	

Esitystapa		
	<ul style="list-style-type: none"> Tyypillinen esitystapa kun kustannusvaikutuksia on mallinnettu YTP-malleilla 	
	+	-
	<ul style="list-style-type: none"> Muodostaa kokonaisvaltaisen kuvan ja tuo ns. aidot kustannukset esille koko yhteiskunnan tasolla 	<ul style="list-style-type: none"> Vaikea arvioida yksittäisten toimenpiteiden vaikutuksia kokonaisuuteen Ei välttämättä nähdä kustannusten kohdistumista eri toimijoille
Kokonaiskustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Yhden toimenpidepaketin tai toimenpiteen kokonaiskustannukset, esimerkiksi kumulatiiviset kustannukset tai kustannukset vuositasolla 	
	+	-
	<ul style="list-style-type: none"> Suoraviivainen esitystapa 	<ul style="list-style-type: none"> Vaikeasti vertailtava tulos, koska ei kerro vaikutuksesta ja kokonaiskustannukset voivat riippua esim. sektorin koosta
Ohjelma-kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Valtiolle aiheutuvat kustannukset toimenpiteestä tai toimenpidepaketista 	
	+	-
	<ul style="list-style-type: none"> Toimiva tapa suunniteltaessa toimenpideohjelmiä ja budjetteja 	<ul style="list-style-type: none"> Sellaisenaan ei riittävä tarkastelu-menettely, todelliset kustannukset etenkin muille toimijoille voivat jäädä näkymättömiksi

Kustannustehokkuuden, nimenomaan EUR/tCO₂, laskentaan on olemassa useampi tapa. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 6-5) on esitetty muutamassa keskeisessä raportissa käytetyt menetelmät.

Taulukko 6-5 EUR/tCO₂ kustannuksen määrittäminen

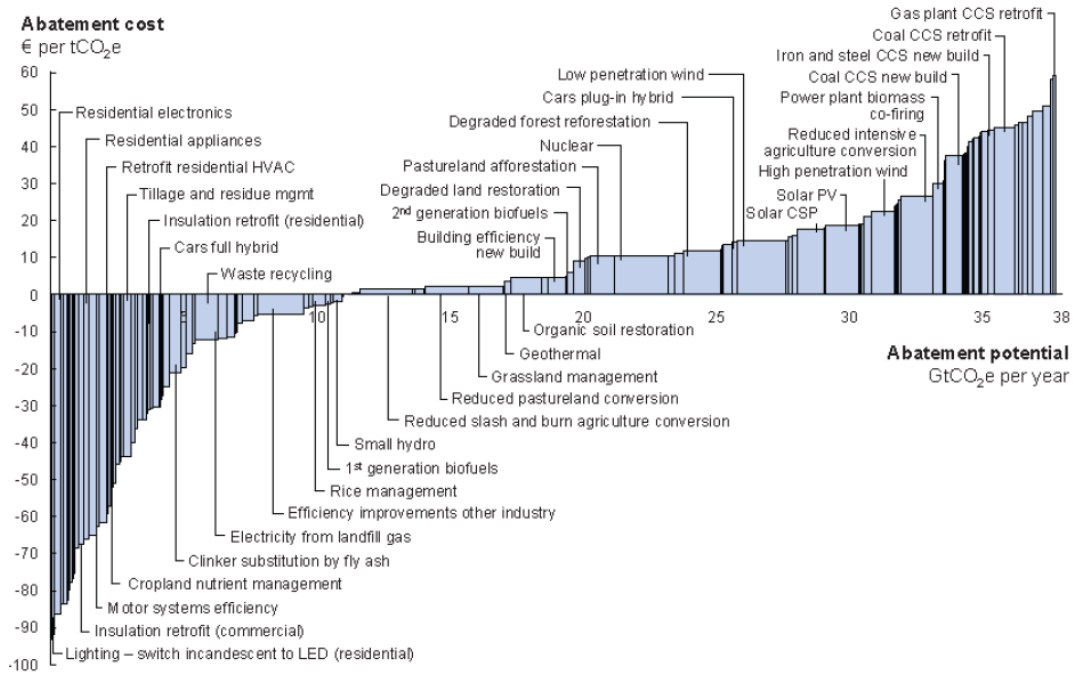
Britannia yleinen menetelmä-kehikko (BEIS, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> Selvityksessä on määritetty kaava, jonka mukaan kustannustehokkuus on investoinnin tai toimenpiteen nettonykyarvon ja päästövähennysten nykyarvon erotus jaettuna kumulatiivisilla päästösäästöillä laskentajakson yli. Negatiivinen lopputulos tarkoittaa sekä kustannussäästöjä että päästösäästöjä $CE_s = -\frac{NPV - PVC_s}{\sum_{t=1}^Y C_{s,t}} (= \text{€}/\text{tCO}_2)$ <ul style="list-style-type: none"> Päästövähennysten nykyarvo viittaa Britanniassa käytettyyn hiilidioksidin varjohintaan, jolla on pyritty arvioimaan päästöjen aiheuttamaa kustannusta. Tästä suoraan johdettuna vähennetyillä päästöillä on laskennassa rahallinen arvo. Kirjallisuuskatsauksen perusteella tosin tämä komponentti ei ole aina mukana laskennoissa
Saksa – Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (PwC 2016)	<ul style="list-style-type: none"> Selvityksessä yhdistetään yksittäiselle toimelle laskettu kustannus ja CO₂e-päästövähennys kumulatiivisesti toimen koko elinkaaren ajalta kaavalla E = D / A, jossa <ul style="list-style-type: none"> E = toimikohtainen vähennyskustannus (EUR/tCO₂e) D = nettokustannukset (milj. EUR), jotka koostuvat toimen bruttokustannuksesta (B) vähennettynä toimesta saaduilla säästetyillä energiakustannuksilla (C) A = arvioitu päästövähennys (milj. t CO₂e) E voi olla joko positiivinen tai negatiivinen lukuarvo riippuen säästettyjen energiakustannusten suuruudesta (arvo C, joka vaikuttaa arvoon D). Mikäli säästetty energiakustannus on suurempi kuin bruttokustannus, on toimikohtainen vähennyskustannus negatiivinen. Bruttokustannuksiin kuuluu sekä

	<p>teknologiakustannuksia että valtiolle aiheutuvia toimen toteuttamiseen liittyviä kustannuksia. Negatiivinen arvo tarkoittaa sitä, että tarkasteluajanjakson aikana säästävät energiakustannukset tuottavat enemmän hyötyä kuin toimenpiteeseen allokoidut kustannukset. Eli toimenpide säästää pitkällä ajanjaksolla enemmän kustannuksia kuin mitä se kuluttaa.</p> <ul style="list-style-type: none"> • On myös huomiotava, että kaikkien toimien kohdalla energiasäästöt (C) eivät välttämättä ole positiivisia. Toisin sanoen energiaa ei säästetä vaan sitä tulee kulumaan enemmän kuin nykyisessä mallissa. • Kustannussäästö on diskontattu referenssivuoden (2015) arvoon.
Cost-efficient emission reduction pathway to 2030 for Finland (McKinsey, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Selvityksessä on käytetty vuotuista päästövähennystä vuonna 2030 suhteessa kustannuksiin, yksikkönä EUR/tCO₂. • Kustannukset on arvioitu keskimääräistämällä elinkaarikustannukset vuositasolle. Toimenpiteen kustannus on päästövähennysskenaarion ja perusuran elinkaarikustannusten erotus. Samankaltaisille tai samaan toimenpiteeseen kuuluvat kustannukset on arvioitu toimenpiteen keskiarvoisina kustannuksina ajankohta huomioiden, niin että esim. vuonna 2020 ja 2029 tapahtuvat toimenpiteet yhdistetään keskiarvoistamalla niiden kustannukset. • Elinkaariltaan yli vuoden 2030 ylittävien toimenpiteiden ja teknologioiden kustannuksista laskentaan jyvitetään vain osa kustannuksista tarkastelujaksolle. Esim. vuonna 2028 tapahtuvasta investoinnista (investoinnin pitoaika 10 vuotta) arvioidaan vain vuoteen 2030 mennessä tapahtuvat investointikustannukset. Laskennallisesti tämä jyvitetään seuraavanlaisesti: $(2030 - 2028) / 10 = 20 \%$.

MAC-käyrien rajoitukset

MAC-käyrä eli rajakustannuskäyrä (marginal abatement cost curve) kuvaa eri toimenpiteiden päästövähennyspotentiaalin kustannustehokkuusjärjestyksessä. MAC-käyrien taustalla on monesti huomattava määrä oletuksia, eikä niitä usein tuoda riittävästi esille. Suurimpana haasteena on eri interaktioiden huomioon ottaminen: yhdelle käyrälle piirrettynä kuvio voi luoda mielikuvan, että eri toimenpiteiden ja sektorien väliset interaktiot on huomioitu, vaikka näin ei välttämättä ole. MAC-käyrät voivat olla myös skenaariotyyppisiä tarkasteluja, jolloin käyrän eri toimenpiteiden välillä voi olla isoja riippuvuuksia. Esimerkiksi ”edullisten” toimenpiteiden kannattavuus voi riippua kalliimpien toimenpiteiden toteuttamisesta. Eli niitä ei voi välttämättä tulkita järjestettynä listana toimenpiteitä, joita voi toteuttaa kustannustehokkuusjärjestyksessä, vaan kalliimman toimenpiteen tekemättä jättäminen voi vaikuttaa myös edullisimpiin toimenpiteisiin. Lisäksi täytyy muistaa, että MAC-käyrä on aina tiettyihin lähtöoletuksiin perustuva kokonaisuus eikä yksittäisen toimenpiteen päästövähennyspotentiaalia ja kustannuksia voi irrottaa kokonaisuudesta. MAC-käyrien hyvänä puolena pidetään niiden selkeää esittämistapaa.

Kuva 6-4 Esimerkki MAC-käyrästä – päästövähennystoimenpiteiden kustannukset (Naucler & Enkvist, 2009)



Energiatohokkuusvaje

Energiatohokkuusvajeella (englanniksi Energy Efficiency Gap) tarkoitetaan tilannetta, jossa kustannustehokkaita toimenpiteitä ei toteuteta, vaikka niillä olisi kustannusten puolesta positiivinen nettohyöty. Positiivisen nettohyödyn toimenpiteillä on päästövähennysten kustannustehokkuuslaskennassa negatiivinen kustannustehokkuus, mikä johtuu siitä, että ne ovat jo pelkästään kustannusnäkökulmasta kannattavia, myös ilman päästövähennysten huomiointia. Toimenpiteet ovat siis joka tapauksessa toteuttamisen arvoisia, ns. "no-regrets" vaihtoehtoja. Tyypillisimpiä esimerkkejä tästä ovat erilaiset rakennusten energiatohokkuustoimenpiteet, kuten lisäeristäminen ja energian käytön optimointi, jotka ovat monesti rakennuksen omistajalle kannattavia ja pitkällä aikavälillä kustannuksia säästäviä toimenpiteitä. Tästä huolimatta niiden laaja käyttöönotto on huomattavasti vähäisempää kuin voisi olettaa. Tälle on mahdollisesti useita syitä, kuten esimerkiksi epätäydellinen informaatio ja ihmisten käyttäytymisen ennakointiin liittyvät vaikeudet.

Energiatohokkuusvajeesta puhuessa viitataan tyypillisesti juurikin rakennusten energiatohokkuuteen, mutta se voi antaa laajemmin viitteen siitä, miksi sellaisenaan kustannustehokkaat toimenpiteet eivät välttämättä toteudu itsestään. Kysymys on relevantti mm. tulkittaessa MAC-käyrän kaltaisia tuloksia jotka usein sisältävät päästövähennyskustannustehokkuudeltaan negatiivisia toimenpiteitä (katso esim. Kuva 6-4).

MAC-käyrien tapauksessa toimenpiteen negatiivinen kustannustehokkuus saattaa johtua niiden muodostamismenetelmästä. Toimenpiteillä voi olla keskinäisiä riippuvuuksia, niin että edullisempi toimenpide edellyttää kalliimman toteutumista, mikä tarkoittaa sitä, että todellisuudessa kokonaistoimenpiteen kustannustehokkuus ei ole negatiivinen, vaikka toinen niistä voi käyrällä näyttää siltä. Tämän kaltaiset rajoitukset on esitetty ”MAC-käyrien rajoitukset” -osiossa.

Energiatehokkuusvajetta on tutkittu suhteellisen paljon. Mm. Gerarden ym. (2017) tekivät meta-analyysin, jossa he tarkastelivat eri energiatehokkuusvajetta tutkineita selvityksiä. Heidän mukaansa selitykset voidaan karkeasti jakaa kolmeen kategoriaan: 1) markkinoiden epäonnistuminen, 2) käyttäytymiseen liittyvät selitykset ja 3) mallinnuksen tai laskennan epätäydellisyys. Markkinoiden epäonnistuminen ja käyttäytymiseen liittyvät selitykset selittävät, miksi energiatehokkuusvaje ei kuroudu umpeen, ja mallinnuksen tai laskennan epätäydellisyydet voivat johtaa siihen, että energiatehokkuuden potentiaali on ylipäätään arvioitu yläkanttiin. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 6-6) on esitetty Gillingham & Palmerin (2014) selvityksessä tunnistetut selitykset energiatehokkuusvajeelle.

Taulukko 6-6 Mahdollisia selityksiä energiatehokkuusvajeelle (Gillingham & Palmer, 2014)

Kategoria	Selitys	Kuvaus
Markkinoiden epäonnistuminen	Epätäydellinen informaatio	<ul style="list-style-type: none"> Kuluttajilla ja päätöksentekijöillä voi olla epätäydellistä informaatiota mahdollisista säästöistä, jolloin heidän halukkuutensa investoida laskee. Joissain tapauksissa energiatehokkaan palvelun myyjällä on enemmän informaatiota, mikä johtaa informaation asymmetriaan ja pahentaa epätäydellisen informaation ongelmaa.
	Päämies-agentti-ongelma	<ul style="list-style-type: none"> Hyötyvä taho (esim. energiaa käyttävä taho) on eri kuin päätöksentekijä tai investoija. Esimerkiksi talon omistaja on maksajan roolissa, mutta mahdolliset hyödyt energiatehokkuudesta voivat kohdistua vuokralaiselle.
	Luottorajoitteet	<ul style="list-style-type: none"> Energiatehokkuustoimet voivat vaatia huomattavia alkuinvestointeja ja velkaraaha. Tällöin luoton saanti voi toimia rajoitteena investoinneille.
	Oppiminen käytön kautta	<ul style="list-style-type: none"> Uusien energiatehokkuutta parantavien teknologioiden käyttö voi tuottaa tietoa, mikä voi siirtyä heijastevaikutusten kautta muille toimijoille. Tällöin ensivaiheen toimijoilla on vähemmän kannustimia hyödyntää energiatehokkuutta parantavia teknologioita.
	Regulaatiovirheet	<ul style="list-style-type: none"> Regulaatio voi vaikuttaa esimerkiksi hintoihin ja hintasignaaleihin. Puuttuvat hintasignaalit puolestaan vaikuttavat energiatehokkuusinvestointien kannattavuuteen.
Käyttäytymiseen liittyvät selitykset	Epäjohdonmukaiset preferenssit	<ul style="list-style-type: none"> Kuluttajien ja päätöksentekijöiden ns. epärationaaliset preferenssit (vs. klassinen talousteoriat), kuten:

Kategoria	Selitys	Kuvaus
		<ul style="list-style-type: none"> Ajan suhteen epäjohdonmukaiset preferenssit (esim. kaukaisen tulevaisuuden hyötyjä diskontataan korkeammalla korolla kuin lähitulevaisuuden). Referenssi riippuvaiset preferenssit (esim. kuluttajan arvoitus riippuu suhteellisesta muutoksesta ja referenssipisteestä; mikäli kuluttaja saa tililleen 1000 euroa, on vastaanotto erilainen riippuen tilillä jo olevasta rahasummasta tai siitä, milloin tilisiirto tapahtuu).
	Epäjohdonmukaiset uskomukset	<ul style="list-style-type: none"> Systemaattisesti virheelliset oletukset tulevaisuudesta.
	Epäjohdonmukainen päätöksenteko	<ul style="list-style-type: none"> Klassisen taloustieteen oletusten vastainen päätöksenteko, kuten rajallinen huomiokyky ja sen aiheuttama tietyn informaation riittämätön huomiointi, päätösten riippuvuus ulkoisista tekijöistä ja epäoptimaaliset heuristiikat ("peukalosäännöt").
Mallinnuksen tai laskennan epätäydellisyys	Piilokustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Erlaiset kustannuserät, joita ei ole huomioitu analyysissä. Näitä ovat esim. transaktiokustannukset, hallinnolliset kustannukset ja tiedon hakuun käytetyn ajan kustannukset.
	Kuluttajien heterogeenisuus	<ul style="list-style-type: none"> Kuluttajilla voi olla erilaisia preferenssejä ja he reagoivat eri tavalla hintasignaaleihin.
	Epävarmuus	<ul style="list-style-type: none"> Päätöksentekoon liittyy epävarmuutta esim. tulevaisuuden hintakehityksistä, mikä muuttaa päätöksenteon periaatteita. Tätä ei usein huomioida laskennassa jotka perustuvat yleensä "täydelliseen tietoon tulevaisuudesta".
	Energiasäästöjen yliarviointi	<ul style="list-style-type: none"> Laskennassa saatetaan yliarvioida energiasäästöjä jos ei esimerkiksi huomioida eri toimenpiteiden päällekkäisiä vaikutuksia.
	Rebound-vaikutukset	<ul style="list-style-type: none"> Energian kysyntä oletetaan tyypillisesti staattiseksi, niin että energiatehokkuustoimenpide ei vaikuta kysyntään. Todellisuudessa rebound-vaikutuksen vuoksi loppuenergian kulutus saattaa kasvaa energiatehokkuustoimenpiteen seurauksena.

Kirjallisuudesta löytyy monia esimerkkejä, joissa mallinnuksen tai laskennan epätäydellisyyksiä on pyritty huomioimaan. Esim. Elementent Energy (2011) on uusiutuvien lämmitysteknologioiden käyttöönoton analyysissä pyrkinyt huomioimaan mm. piilokustannuksia arvioimalla tiedon hankintaan käytetyn ajan ja arvon, kuluttajien heterogeenisuutta kategorisoimalla kuluttajat useaan luokkaan ja epävarmuutta mallintamalla kuluttajien valinnat "todennäköisyys hankkia" -takaisinmaksuaikakäyrillä. Analyysi on tehty skenaariotarkasteluiden kautta.

6.1.8 Muiden hyötyjen tarkastelu

Tässä selvityksessä pääpainona on päästövähennysten kustannustehokkuuden arviointi. Päästövähennystoimenpiteillä on kuitenkin myös muita vaikutuksia itse päästövähennysten lisäksi. Esimerkiksi SOVA-laki (Laki viranomaisten suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutusten arvioinnista) antaa osviittaa siitä, mitä erilaisia vaikutuksia ja hyötyjä voidaan arvioida. SOVA-lain mukaan toimenpiteiden arvioitavia ympäristövaikutuksia ovat:

- Vaikutukset ihmisten terveyteen, elinoloihin ja viihtyvyyteen;
- maaperään, vesiin, ilmaan, ilmastoon, kasvillisuuteen, eliöihin ja luonnon monimuotoisuuteen;
- yhdyskuntarakenteeseen, rakennettuun ympäristöön, maisemaan, kaupunkikuvaan ja kulttuuriperintöön;
- luonnonvarojen hyödyntämiseen.

Päästövähennystoimenpidearvioinnin näkökulmasta tyypillisimmät tarkasteltavat näistä ovat pienhiukkaspäästöt (vaikutukset ihmisten terveyteen) ja luontoon liittyvät hyödyt. Tyypillisesti tarkastelua joko ei ole tehty tai se on tehty hyvin yleisellä ja kvalitatiivisella tasolla.

Muita tarkasteltavia hyötyjä ovat yleiset kansantaloudelliset mittarit, kuten työllisyys, vaihtotase ja eri sektorien kehitys. YTP-mallinuksissa nämä hyödyt voidaan kvantifioida.

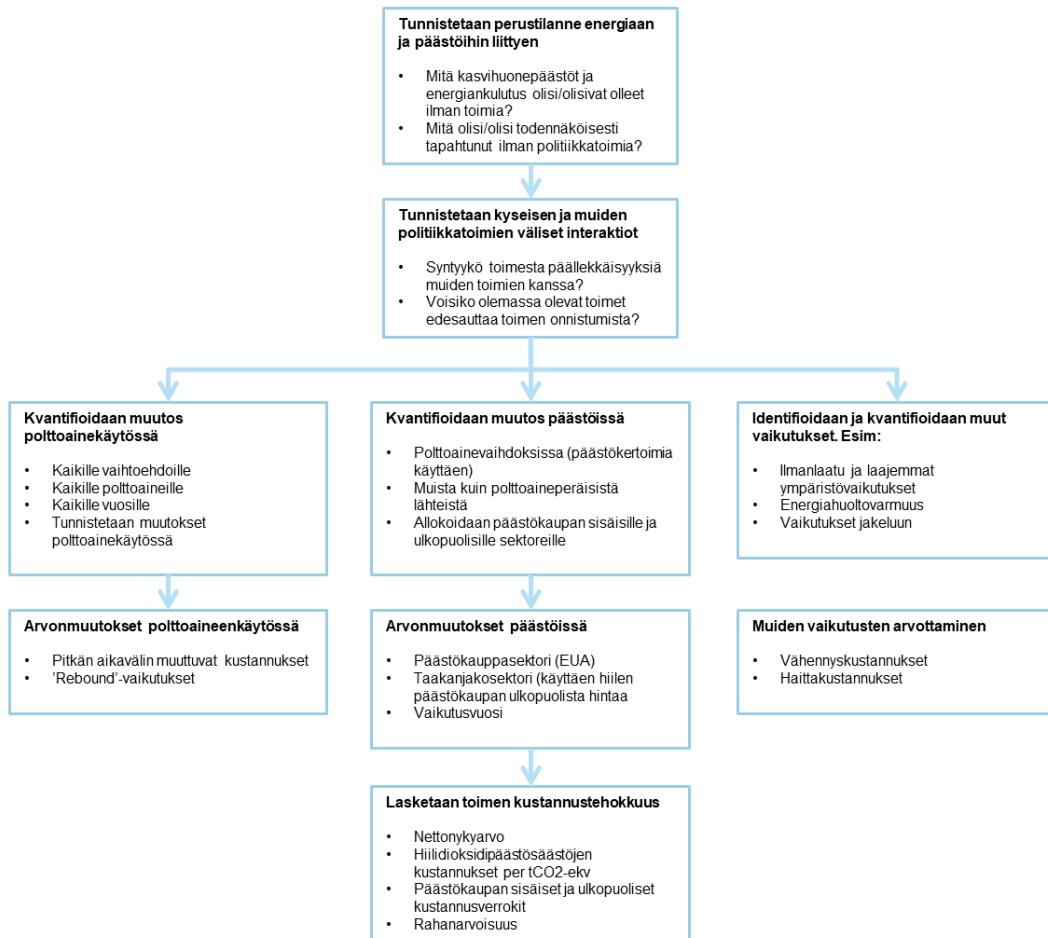
6.2 Viitekehykset kustannustehokkuuden arviointiin

Päästövähennysten kustannustehokkuusarviointiin on tehty erilaisia viitekehyksiä, joiden tarkoituksena on edesauttaa ja standardisoida analyyssejä. Tässä osiossa esitetään esimerkinomaisesti Britannian valtiovarainministeriön julkaisema ohjearpotti, joka sisältää ohjeistuksen ja yleisen viitekehyksen, jolla voidaan arvioida erilaisia politiikkatoimia. Raportti sisältää selvityksen energian käyttöön ja päästöihin vaikuttavien politiikkatoimien arvioinnista (Valuation of Energy Use and Greenhouse Gas (GHG) Emissions Supplementary guidance to the HM Treasury Green Book on Appraisal and Evaluation in Central Government). Selvitys tarjoaa päästövähennystoimien arviointiin tarkoitettua menetelmäkehikkoa (Kuva 6-5). (BEIS 2018)

Kehikko koostuu kuudesta osasta:

1. Aluksi arvioidaan perustilanne, joka kuvaa päästöjen ja/tai energian käytön kehitystä ilman analysoitavia politiikkatoimia.
2. Seuraavaksi arvioidaan analysoitavan politiikkatoimen ja muiden mahdollisten politiikkatoimien interaktio ja risteävät vaikutukset. Lisäksi arvioidaan, vaikuttaako toimi pelkästään kohdesektorilla vai syntykö vaikutuksia myös muille sektoreille sekä syntykö valitusta toimesta päällekkäisyyksiä muiden toimien kanssa.
3. Arvioidaan toimen vaikutus polttoaineiden kulutukseen eri vuosille ja eri skenaariolle, sekä arvioidaan näiden vaikutusta hintoihin (esim. pitkän aikavälin marginaalikustannus).
4. Arvioidaan vaikutus päästöihin ja niiden kustannusvaikutus.
5. Tunnistetaan ja kvantifioidaan muut vaikutukset, kuten vaikutus ilmanlaatuun ja huoltovarmuuteen sekä arvioidaan näiden kustannus.
6. Lasketaan valitun toimen kustannustehokkuus

Kuva 6-5 Päästövähennystoimien arvioinnin menetelmäkehikko (BEIS 2018)



Tässä arviointikehikossa muodostetaan aluksi vaihtoehtoinen ”ei-toimia” -skenaario, eli millä tavalla päästöjen määrä tai polttoaineiden käyttö kehittyisi ilman analysoitavaa toimea. Poliittikkatoimen toimivuus arvioidaan tätä skenaariota vasten. Seuraavaksi tunnistetaan toimen mahdolliset päällekkäiset ja risteävät vaikutukset muihin sektoreihin tai muihin politiikkatoimiin.

Raportissa esitetään kaava energian käytön muutoksen arvioimiselle. Arvo lasketaan kertomalla energian käytön muutos energian pitkän aikavälin muuttuvalla kustannuksella. Lisäksi arvioidaan suorat kompensatiovaikutukset energian kulutuksen muutokselle. Näitä voivat olla esimerkiksi energian käytön nousu energiatehokkuustoimien takia. Raportissa tunnistetaan epäsuorat kompensatiovaikutukset (esim. energiatehokkuusesimerkissä vähentyneestä energialaskusta saatujen tulojen käyttö muihin, mahdollisesti päästöä aiheuttaviin toimiin), mutta niitä ei raportin ohjeistuksen mukaan tarvitse välttämättä ottaa toimien analysoimisessa huomioon, koska niiden laskeminen on haastavaa ja vaadittava analyysi ei ole työmäärältään kannattava suhteessa mahdolliseen hyötyyn tai tuloksen merkitykseen.

Selvityksessä suositellaan, että arvioissa huomioidaan myös toimen vaikutus päästöihin ulkomailta. Päästövähennysten arvioinnille on annettu suoraviivainen kaava: kerrotaan toimen aikaansaama vuosittainen polttoaineen käytön vähennys sen vuosittaisen marginaalisella päästökertoimella. Viitekehyskokonaisuuteen kuuluu myös lukuisia taulukoita, joissa esitetään yleisten polttoaineiden päästökertoimia, sähkön marginaalinen ja keskiarvoinen päästökerroin ja pitkän ajan ennuste, hiilidioksidin hinta/kustannukset, ilmanlaadun arvioidut kustannukset ja erilaisia hintaennusteita.

Viitekehys ohjeistaa arvioimaan myös muut vaikutukset, kuten vaikutukset ilmanlaatuun, muut ympäristövaikutukset ja energian huoltovarmuus. Lopuksi lasketaan toimen kustannustehokkuus seuraavalla kaavalla:

$$CE_s = -\frac{NPV - PVC_s}{\sum_{t=1}^Y C_{s,t}}$$

jossa CE on kustannustehokkuus sektorilla s, NPV on toimen nettonykyarvo, PVC on päästöjen muutoksen nettonykyarvo, C on kasvihuonepäästöjen muutos per vuosi ja Y on laskentahorisontti. Raportissa todetaan myös, että eri toimia ei pitäisi asettaa järjestykseen pelkän kustannustehokkuuden mukaan, sillä eri toimilla on hyvin erilaiset päästövähennysprofiilit, eli päästövähennykset voivat ajallisesti sijoittua eri vuosille, kuten etupainotteisesti tai takapainotteisesti suhteessa tavoitevuoteen (BEIS 2018).

7 Kustannustehokkuusarviointi eri sektoreilla ja esimerkkilaskelmat

Tässä luvussa käydään läpi kolme valittua sektoria: liikenne, rakennusten erillislämmitys ja maatalous edellisessä luvussa esitetyn kehikon kautta. Tavoitteena on tuoda esille eri selvityksissä käytettyjä kustannustehokkuusanalyysimenetelmiä ja tämän pohjalta löytää toimivia käytäntöjä yleisesti. Samalla on tarkoitus tunnistaa sektoreille ominaisia käytäntöjä. Jokaisesta sektorista 1) esitetään keskeisiä kustannustehokkuusanalyysiin vaikuttavia ominaisuuksia, 2) kuvataan ja analysoidaan eri selvityksissä käytettyjä metodologioita, ja valikoidut selvitykset esimerkinomaisesti, 3) esitetään esimerkkilaskelma, jolla pyritään validoimaan aikaisemissa kohdissa esille tuotuja havaintoja, ja lopuksi edellä mainittujen vaiheiden ja työpajojen perusteella 4) esitetään yhteenveto. Useita raportteja on tuotu esille suhteellisen yksityiskohtaisesti, koska työn tavoitteena on metodologia-analyysin lisäksi tuoda esille erilaisia laskentamenetelmiä. Tarkastelu pyrkii sisältämään merkittävimmät aihetta käsittelevät raportit. Useita kustannustarkastelua sisältäviä selvityksiä ei ole otettu mukaan tarkasteluun, koska niissä ei ole arvioitu toimenpiteiden kustannustehokkuutta.

7.1 Liikennesektori

7.1.1 Liikennesektori päästövähennysten laskentanäkökulmasta

Liikennesektori on taakanjakosektoreista päästöjen puolesta suurin ja siinä on myös eniten päästövähennyspotentiaalia. Liikennesektorin päästöt riippuvat seuraavista tekijöistä:

1. Liikennesuorite (hkm, tkm)¹ – kuinka monta kilometriä liikutaan eri liikennevälineillä
2. Energiatehokkuus (l/km, kg/km, kWh/km) – kuinka paljon polttoainetta tai energiaa liikenneväline kuluttaa per liikuttu matka

¹ hkm = henkilökilometri = henkilöliikenteen suoriteyksikkö, joka tarkoittaa yhden matkustajan kulkevaa yhden kilometrin matkaa
tkm = tonnikilometri = tavaraliikenteen suoriteyksikkö, joka tarkoittaa yhden tonnin kuorman kuljettamista yhden kilometrin matkan

3. Päästökerroin (g/km, g/hkm, g/tkm, g/kWh, g/l, g/kg) – kuinka paljon päästöjä syntyy kuljettua kilometriä tai käytettyä polttoaineyksikköä kohden

Liikennesektorilla on huomattavasti erilaisia ristikkäisiä ja epäsuoria vaikutuksia, jotka tekevät liikennesektorin päästövähennystoimenpiteiden analysoinnista haastavaa. Alla olevassa taulukossa on listattu esimerkkejä erilaisista ristikkäis- ja epäsuorista vaikutuksista liikennesektorilla (Taulukko 7-1).

Taulukko 7-1 Esimerkkejä erilaisista ristikkäis- ja epäsuorista vaikutuksista liikennesektorilla

Vaikutus	Esimerkki
Intertemporaaliset	Sähköautojen hinta on riippuvainen tuen määrästä. Vaikka teknologia ei olisi vielä tällä hetkellä kilpailukykyistä, sen laajamittainen tukeminen laskee kustannuksia pitkällä tähtäimellä ja tekee sähköautoista tulevaisuudessa kilpailukykyisempiä. Vaikutukset voivat olla myös valtioiden rajat ylittäviä; teknologian hintaan Suomessa voi vaikuttaa esim. Saksan teknologiatukipolitiikka.
Polkuriippuvuudet	Liikennesektorin riippuvuus kalliista infrastruktuurista luo siihen vahvoja polkuriippuvuuksia, ja tietyn teknologian suosiminen voi syrjäyttää muita mahdollisia teknologioita. Esim. kaasuinfrastruktuurin tukeminen voi hidastaa sähköautojen käyttöönottoa, ja luoda "lock-in"-vaikutuksen, jolloin sähköautojen tukeminen ei enää kannata, koska kaasuautojen tarvitsema infrastruktuuri on huomattavasti parempi.
Kompensaatiovaikutukset	Sähköautojen tai liikkumisen palveluiden liikkumisen kilometrikustannukset (joko kokonais- tai muuttuvat kustannukset), voivat luoda suoria ja epäsuoria kompensatiovaikutuksia. Esimerkki suorasta kompensatiovaikutuksesta on mahdollinen liikennesuorituksen kasvu.
Sektorien väliset vaikutukset	Biokaasuliikenteen lisääminen on vahvasti riippuvaista biokaasuntuotannosta, mikä synnyttää linkin maatalous- ja jättesektorille. Sähköautojen päästökerroin riippuu täysin sähköntuotannon päästökertoimesta. Tämä voi olla periaatteessa kulutuksen tai tuotannon keskiarvo- tai marginaalipäästökerroin muodossa gCO ₂ /MWh. Tässä selvityksessä esimerkkilaskennassa on käytetty keskimääräistä kulutuksen päästökeroa, ja sitä on kuvattu yksityiskohtaisemmin esimerkkilaskennassa. Lisäksi sähköautot kasvattavat sähkön kysyntää ja voivat luoda uusia vaatimuksia sähkönsiirtoinfrastruktuurille.
Toimenpiteiden päällekkäiset vaikutukset	Toimenpiteillä voi olla huomattavasti päällekkäisiä vaikutuksia. Esimerkiksi vähäpäästöisten käyttövoimien käyttöönotto ja polttoaineen bio-osuuden kasvattaminen ovat molemmat päällekkäisiä toimia. Vähäpäästöisten käyttövoimien kasvava käyttöönotto vähentää liikenteessä tarvittavien biopolttoaineiden määrää.

Perusuran määrittämiseen liikennesektorilla liittyy tiettyjä haasteita, sillä se vaatii mallinnusta. Mm. teknologian kehityksen vuoksi KAISUn liikennesektorin perusura on jo lähtökohtaisesti epävarma, sillä kehitys ei ole ollut ennakoitua mukainen. Myös polttoaineiden hintakehitys tuo omat haasteensa perusuran määrittämiseen.

Maailmanmarkkinahinnoilla ja teknologian kehityksellä on huomattava vaikutus liikennesektoriin ja toteutettavissa oleviin päästövähennystoimiin – öljyn hinnan lasku vai-

kuttaa negatiivisesti vaihtoehtoisten käyttövoimien kustannuskilpailukykyyn. Teknologian kehitysoletuksilla on myös huomattava vaikutus eri teknologioiden houkuttelevuuteen ja päästövähennystoimien kustannustehokkuuteen. Myös autoteollisuuden strategiset valinnat vaikuttavat olennaisesti eri käyttövoimia hyödyntävien autojen tarjontaan.

Liikennesektorilla on myös huomattavia epäsuoria ja yleisempiä kansantaloudellisia vaikutuksia sen luonteesta ja koosta johtuen. Toimenpiteillä voi olla vaikutuksia eri sektorien työllisyyteen ja kuluttajien ostovoimaan. Pelkästään epäsuorien kustannusten vaikutus voi olla 20–30 % kokonaiskustannuksista (työpajoissa esitetty asiantuntijarvio).

7.1.2 Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta liikennesektorilla

Seuraavassa on kuvattu liikennesektorin päästövähennystoimien kustannustehokkuuden mallinnusta ja laskentaa Isossa-Britanniassa, Ruotsissa ja Saksassa.

Iso-Britannia (CCC 2015a & Hill ym. 2018)

Tässä esitetyn tarkastelun on tehnyt Ison-Britannian Committee for Climate Change (CCC). Tarkasteltuja päästövähennystoimia ovat perinteisten polttomoottoriautojen tehokkuuden parantaminen, vähäpäästöisten autojen käyttöönotto (pääsääntöisesti sähköautot), biopolttoaineiden käytön lisääminen, käyttäytymisen muutos sekä parannukset rautatie- ja rahtiliikenteessä. Päästövähennysskenaario on rakennettu kaikista näistä toimista. Kaikille toimille on esitetty kustannustehokkuus muodossa £/CO₂e, mutta arvioinnin metodologiaa ei pääsääntöisesti ole kuvattu tarkasti.

CCC:n tarkastelussa päästövähennysskenaarioon mukaan otettuja toimia ei ole priorisoitu tai valittu puhtaasti kustannuslaskelman perusteella, vaan skenaario edustaa CCC:n näkemystä ”järkevistä ja kustannustehokkaista” polusta. (CCC 2015b)

Sähköautojen käyttöönottoa on tarkastelussa analysoitu Element Energy:n kehittämällä mallilla, joka ottaa huomioon sekä taloudelliset että muut tekijät ja niiden vaikutukset käyttöönottoon. Malli on ns. kuluttajavalintamalli, eli siinä mallinnetaan miten eri kuluttajaryhmät valitsevat eri ajoneuvoteknologioita ottaen huomioon niiden kustannukset ja kuluttajaryhmien ’maksuhalukkuuden’ (willingness-to-pay).

Päästövähennysten kustannustehokkuus on arvioitu vertaamalla sähköauton kustannuksia vs. polttomoottoriautot ja sähköautoista syntyviä päästövähennyksiä. Kustannuslaskenta on tehty arvioimalla sähköauton hankintahinnan preemiota ja vertaamalla sitä käyttökustannussäästöihin. (CCC 2015b). Sähköautojen kotilatausasemat on huomioitu analyysissa lisäämällä niiden kustannukset autojen hankinnan kokonaiskustannuksiin, mutta kustannusanalyysissa ei ole huomioitu muun latausinfrastruktuurin kustannusta.

CCC:n tarkastelussa pitkän aikavälin teknologian itseään vahvistavia vaikutuksia (esim. sähköautojen määrän kasvattaminen tekee tulevaisuuden sähköautoista kannattavampia ja houkuttelevampia) ei ole otettu laskennallisesti huomioon, mutta ne on huomioitu skenaarion rakentamisessa. CCC:n analyysin mukaan sähköautot eivät ole kustannustehokkaita kuin vasta 2020 jälkeen, mutta ne on tuotu osaksi skenaariota, koska oletetaan että käyttöön oton tukeminen tukee kustannustehokkuuden paranevista pitkällä aikavälillä.

Kerrannaisvaikutukset ja risteävät vaikutukset on tarkastelussa huomioitu yksinkertaistaen. Sähköautojen päästöt pohjautuvat sähkön tuotannon arvioituun päästökertoi-
meen tulevaisuudessa. Sähköautojen vaikutus energiasektorille on huomioitu kasvat-
tamalla sähkön kysyntää energiasektorilla 20 TWh. Biopolttoaineiden kustannustehok-
kuutta laskettaessa ei ole otettu huomioon kilpailevia käyttökohteita biopolttoaineille,
mutta se on huomioitu sanallisesti analyysissa. (CCC 2015b)

CCC:n käyttämät hintaennusteet perustuvat Hill ym. (2018) tekemään laajaan raport-
tiin. Raportissa on selvitetty erilaisten matalapäästöisten ajoneuvoteknologioiden kus-
tannuskehitystä ja niillä saavutettavien päästövähennysten kustannustehokkuutta
vuoteen 2030 asti. Selvityksen tarkoituksena oli tuottaa yksityiskohtaista tietoa tarjolla
olevista eri ajoneuvoteknologioista (autot ja kevyet ajoneuvot) ja niiden kustannuske-
hityksestä päästövähennystoimien analysoimisen tueksi. Eri teknologioiden päästö-
hyötyjen arvioinnit pohjautuvat kirjallisuuskatsaukseen, asiantuntijakyselyihin ja simu-
lointeihin. Teknologian kustannuskehitys on arvioitu skaalaamalla vuoden 2013 tekno-
logiakustannuksia ns. oppimiskäyrällä.

Ruotsi (Naturvårdsverket 2017, WSP 2018 ja Copenhagen Economics 2016)

Ruotsin ympäristösuojeluviranomaisen julkaisemassa raportissa on arvioitu henkilöau-
tojen hiilidioksidipäästövähennyksiä ja niihin liittyviä kustannuksia (Naturvårdsverket,
2017). Henkilöautojen käyttö tuottaa suurimman osan liikennesektorin aiheuttamista
päästöistä. Vertailussa on suoritettu kustannuslaskenta perustuen vuosittaisiin inves-

tointikustannuksiin, käyttö- ja ylläpitokustannuksiin sekä polttoainekustannuksiin. Kustannuslaskennassa käytetty diskonttokorko on 4 % eikä kustannuksiin sisälly arvonsäveroä eikä muita veroja tai tukia. Henkilöautojen kustannukset ja päästövähennykset on arvioitu kolmelle eri ajanjaksolle ja kuudelle eri teknologiaskenaariolle.

Eri toimenpiteillä saavutettavat henkilöautojen hiilidioksidipäästövähennykset lasketaan eri käyttövoimien osuuksien muutosten perusteella suhteessa vertailuvaihtoehtoon. Vertailuvaihtoehtossa autojen määrä on sama kuin tutkitulla ajanjaksolla, mutta eri käyttövoimien osuudet oletetaan samoiksi kuin vuonna 2000. Vertailuauton oletetaan olevan bensiinikäyttöinen auto, jonka päästötehokkuus kehittyi 0,5 % vuodessa.

Ruotsin hallitus on tilannut myös raportin siitä, miten liikennesektorin nykyiset verot ja maksut edistävät liikennepolitiikan tavoitteiden saavuttamista (WSP, 2018). Selvityksessä analysoitiin Ruotsin liikennesektorin kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttavien poliittisten toimenpiteiden kustannustehokkuutta. Selvityksessä on arvioitu erityisesti verojen ja maksujen kustannustehokkuutta suhteessa tavoiteltuun 70 prosentin päästövähennystavoitteeseen liikekennesektorilla vuoteen 2030 mennessä.

Analyysissä on verrattu kolmen eri muuttujan vaikutusta henkilöautoilun aiheuttamiin päästöihin. Selvityksessä keskityttiin henkilöautoliikenteeseen, koska tällä sektorilla on eniten ja voimakkaimpia ohjauskeinoja. Laskennassa on tarkasteltu ohjauskeinoja eritellen kolmea eri tapaa vähentää henkilöautoliikenteen päästöjä: 1) vähentämällä henkilöautojen liikennesuoritetta (km), 2) valitsemalla autoja, jotka käyttävät vähemmän polttoainetta ajoneuvokilometriä kohden (kWh/km) ja 3) valitsemalla käyttövoimia, joilla on alhaisemmat päästöt kWh:a kohti. (WSP, 2018)

Henkilöautojen energiatehokkuuden parantamisella saavutettavien päästövähennysten kustannusarvioinnissa tarkasteltiin muun muassa Bonus-Malus-järjestelmää, jossa auton verokohtelu riippuu sen päästöistä (WSP 2018). Bonus-Malus-järjestelmä astui voimaan heinäkuussa 2018, jolloin ajoneuvovero muuttui. Uusiin bensiini- ja dieselautoihin kohdistui roima veronkorotus, joka on voimassa kolme vuotta.

Selvityksessä laskettiin, miten ison kannustimen biopolttoaineen veronalennus antaa kuluttajalle suhteessa biopolttoaineen käytöllä saavutettavaan päästövähennykseen. Päästövähennyksen ja kustannuksen suuruutta arvioitaessa biopolttoainetta on verrattu fossiilisiin vaihtoehtoihin ottamalla huomioon polttoaineiden hiilisisältö ja elinkaaripäästöt.

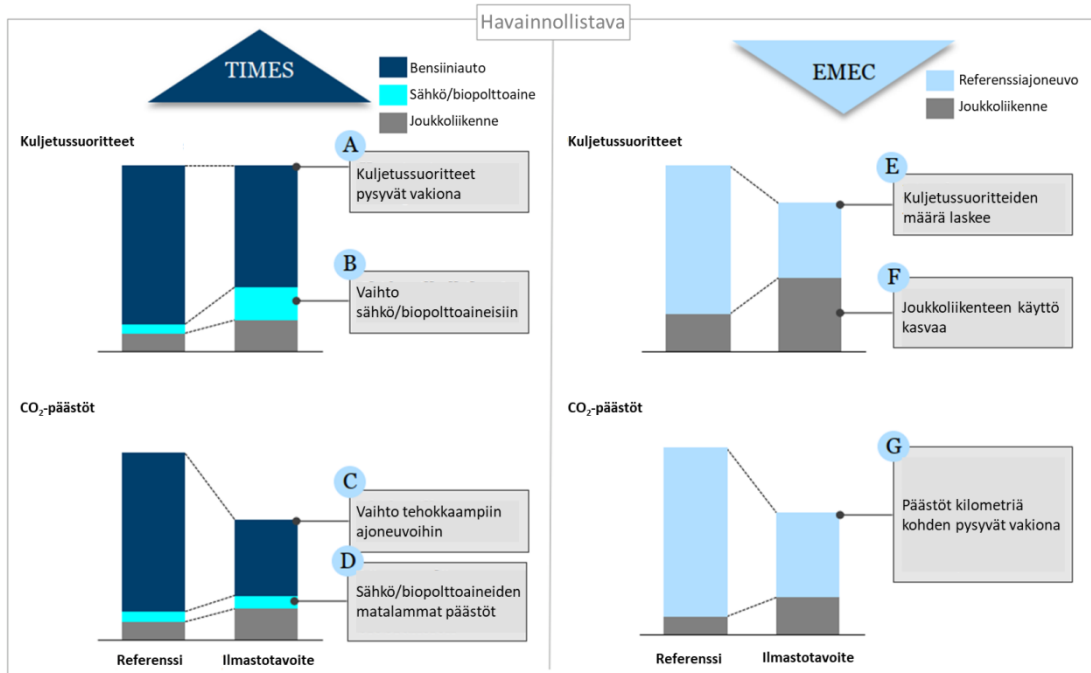
Myös Copenhagen Economics on laatinut selvityksen eri toimenpiteiden vaikutuksesta Ruotsin liikennesektorin päästövähennyksiin ja kustannuksiin, kun tavoitteena on saavuttaa vuoden 2030 ilmastotavoitteet. Raportissa on esitetty 12 erilaista skenaariota

(Kuva 7-1), joiden avulla arvioidaan eri toimenpiteiden vaikutusta kasvihuonekaasupäästöjen määrään (Copenhagen Economics 2016). Nämä skenaariot voidaan jakaa karkeasti kahteen erilaiseen ryhmään, jotka on mallinnettu kahdella eri mallilla: staattisella yleisellä EMEC-tasapainomallilla ja dynaamisella teknologiapohjaisella Times-Sweden-energiasysteemimallilla.

Times-Sweden-malli perustuu teknologian tarjoamien mahdollisuuksien arviointiin, mutta verotuksesta aiheutuvia kulutus- ja tuotantomuutoksia ei mallinnetta. Mallissa liikennesuoritteiden määrä pidetään vakiona, mutta esimerkiksi henkilöliikenteeseen on useita vaihtoehtoja, kuten bensiini- ja dieselautot, biopolttoaine- ja sähköautot sekä erilaiset hybridautot, joiden teknologiat voivat kehittyä. Päästövähennykset saavutetaan mallissa siirtymällä käyttämään vähäpäästöisempiä ajoneuvoja. Malli ottaa huomioon kaikkien vaihtoehtojen kokonaiskustannukset, mm. ostohinnan, käyttöiän, sekä polttoaineet ja huoltokustannukset.

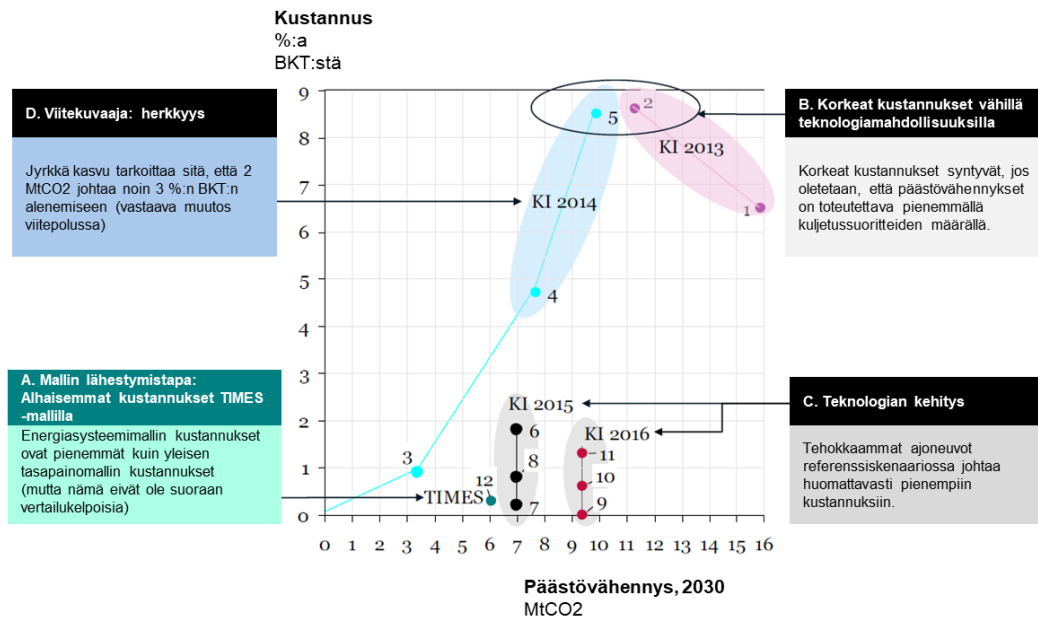
EMEC-malli esittää, mikä olisi kustannustaso, jos tekniset muutokset olisivat hyvin rajallisia, mutta päästötavoitteet pysyisivät samalla tasolla. EMEC-mallin perusurana on päästöennuste vuonna 2030 laskettuna historiatietojen perusteella (vuodet 2013, 2014, 2015 ja 2016), jos ylimääräisiä ohjauskeinoja ei oteta käyttöön. Viime vuosina vuoden 2030 päästöennusteita on tarkennettu merkittävästi politiikan ja teknologisen kehityksen perusteella, minkä vuoksi EMEC-mallissa on eri vuosille omat perusurat. Päästövähennykset saavutetaan mallissa ensisijaisesti vähentämällä liikennesuoritetta. Liikennesuoritteiden määrä voi muuttua myös liikkumisesta aiheutuvien kustannusten seurauksena. Sen vuoksi malli ottaa huomioon esimerkiksi hiilidioksidiveron tuoman hinnan muutoksen. Päästövähennys voi tapahtua myös, jos yksityisautoilusta vaihdetaan julkiseen liikenteeseen.

Kuva 7-1 Eri toimien vaikutukset päästöväheneisiin ja kustannuksiin (Copenhagen Economics, 2016)



Eri skenaarioissa toteutettujen päästövähennystoimien tuottamia päästövähennyksiä verrattiin toimien aiheuttamiin kustannuksiin. Kustannus on ilmaistu prosentteina Ruotsin bruttokansantuotteesta. Arvioinnin perusteella kustannusvaikutuksissa oli hyvin suuria eroja eri skenaarioiden välillä (Kuva 7-2). Joissakin skenaarioissa näyttää siltä, että päästöjä voidaan vähentää tavoitetasoille vaatimattomilla kustannuksilla (alle 0,5 % vuoden 2030 BKT:sta). Toisissa skenaarioissa on suuria kansantaloudellisia seurauksia ja BKT:n lasku voi olla jopa 9 prosenttia. Tärkeä johtopäätös on, että äärimmäiset tulokset johtuvat eri skenaarioiden rajoituksista tai pyrkimyksestä tutkia myös hyvin epätodennäköisten kehityspolkujen vaikutuksia, ja siksi ne vaikuttavat epäuskottavilta.

Kuva 7-2 Päästövähennysten kustannusvaikutukset eri skenaarioissa



Skenaariot, joissa on päädytty erittäin korkeisiin kansantaloudellisiin kustannuksiin perustuvat hyvin epätodennäköisiin oletuksiin käytettävissä olevista päästövähennyskeinoista ja niiden teknisestä kehityksestä. Erityisesti oletetaan, että energiatehokkuuden parantaminen, biopolttoaineiden käytön lisääminen tai sähköajoneuvoihin siirtyminen ei ole mahdollista jo olemassa olevaan referenssiskenaarioon verrattuna. Tällöin päästöjä kuljettua kilometriä kohti ei voida vähentää, minkä vuoksi on vähennettävä liikennesuoritetta. Tämä voi johtaa taloudellisen toimeliaisuuden vähenemiseen useilla aloilla, mikä voi johtaa pienempään bruttokansantuotteeseen.

Selvityksessä on todettu, että yllä kuvattujen skenaarioiden osalta malli ei pysty huomioimaan kaikkia vaikutuksia riittävän pitkälle. Ruotsin ilmastopolitiikan analysoimiseksi tarvittaisiin malleja, joiden avulla voidaan ottaa huomioon myös äärimmäisen korkeiden lisäkustannusten vaikutuksia kuluttajille tilanteessa, jossa teknologiakehitys ei ole riittävän nopeaa. Tällaiset tarkastelut tarjoaisivat laadullisen käsityksen siitä, mitä voisi tapahtua, jos teknologian muutoksia olisi jostain syystä vaikea toteuttaa päästövähennystavoitteen pysyessä samana.

Teknologiakeskeiset skenaariot voivat kuitenkin myös yliarvioida uusien teknisten ratkaisujen leviämisenopeutta. Hitaus ja käyttöönoton esteet voivat johtua mm. mieltymyksistä, käyttäytymisestä, epäsuorista kustannuksista, epävarmuudesta, infrastruktuurista, ja epäonnistumisista markkinoinnissa. Koska teknologian muutosnopeuden arviointi on yleisesti hyvin haastavaa, mallien tuloksia on täydennettävä lisäselvityksillä ja herkkyyksianalyysillä.

Teknologiakeskeiset skenaariot jättävät myös huomiotta tärkeitä mahdollisia kustannuseriä ja kansantaloudellisia vaikutuksia. Kuljetuksen, lämmityksen, teollisuustuotannon, sähkön ym. kustannusten muutokset vaikuttavat talouteen tavalla, joka ei ole ilmeinen, mutta jolla voi olla kauaskantoisia seurauksia. Olemassa olevista mallinnustuloksista on vaikea määrittää, miten tärkeitä nämä ovat käytännössä. Mallinnetuissa skenaarioissa on nähtävissä huomattavia negatiivisia kansantaloudellisia vaikutuksia hyvin korkeilla hiilidioksidiveroilla.

Edellä esitetyt esimerkit osoittavat, että Ruotsissa tehdyissä selvityksissä tunnistettiin merkittäviä epävarmuuksia liikennesektorin päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arviointiin liittyen. Yksittäisiin tuloksiin vaikuttavat voimakkaasti mallien rajoitukset, oletukset siitä, mitä päästövähennystoimenpiteitä on käytettävissä, niiden toteuttamisen nopeus ja mitä taloudellisia lisävaikutuksia (epäsuorat kustannukset, kansantaloudelliset vaikutukset ja muut hyödyt) syntyy. Keskeisimpiä tunnistettuja epävarmuustekijöitä ovat:

- Perusura: Viime vuosina vuoden 2030 päästöennusteita on tarkennettu merkittävästi, sillä esimerkiksi politiikka ja teknologinen kehitys ovat vaikuttaneet perusuran päästötasoihin. Tämä osoittaa, että on hyvin epävarmaa, kuinka suuria lisäpäästövähennyksiä tarvitaan tietyn tavoitteen saavuttamiseksi. Jos päästövähennyksiä tarvitaan arvioitua vähemmän, mallilaskelmien kustannukset ovat yliarvioituja, ja päinvastoin. Analyyseissä olisi sen vuoksi tarkasteltava erilaisia perusuria.
- Polttoaineiden hinnat: Vaihtoehtoisten käyttövoimien lisäkustannukset riippuvat suuresti määrin fossiilisten polttoaineiden hinnoista, ja polttoaineiden hintaennusteet ovat erittäin epävarmoja ja vaihtelevat riippuen ennusteen laatijasta.
- Teknologinen kehitys: Sekä EMEC- että TIMES-Sweden-malleissa tehdään oletuksia uusien teknologioiden kustannuksista. Koska nämä oletukset vaikuttavat suoraan päästövähennyskeinojen lisäkustannuksiin, ovat erittäin epävarmoja ja muuttuvat monien teknologioiden osalta nopeasti, on tärkeää tutkia miten erilaiset kustannusoletukset vaikuttavat mallinnustuloksiin.

Selvityksen yksi johtopäätös on, että mallit ovat rajallinen osa kansantaloudellisia vaikutuksia koskevan päätöksenteon tausta-aineistoa. Selvityksen perusteella paremman kuvan saamiseksi tarvitaan muihin menetelmiin perustuvia täydentäviä analyyssejä. Tämän lisäksi on otettava huomioon myös muita tekijöitä, jotka olisivat arvokkaita Ruotsin ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi:

- Muut hyödyt (esim. ilman pilaantumisen väheneminen) tai mahdolliset sivukustannukset.
- Yhteiskunnan rakennemuutos: mallit eivät välttämättä huomioi oikein muutoksen toteutumisen aikataulua, eikä sitä, kuinka muutokseen reagoidaan. EMEC:ssä ei huomioida muutosten ajankohtia ja tarvittavia päästövähennystoimenpiteitä.

- Kustannukset, jotka voivat syntyä lyhyellä aikavälillä talouden rakennemuutosten vuoksi.
- Hitaus, esteet ja käyttäytymisen muutos – erityisesti liikennesektorilla.
- Uusien energiaratkaisujen vaatimat investoinnit ja liiketoimintamallit.

Saksa (2020-ilmastostrategian taloudellinen ja ympäristöllinen tarkastelu: tausta ja metodi PwC, 2016)

PwC:n raportissa on eroteltu päästövähennysten ja kustannusten määrät sekä laskentametodit toimikohtaisesti. Lopussa kokonaispäästövähennysmäärä ja -kustannus on saatu summaamalla kaikkien toimenpiteiden lukumäärät yhteen. Toimenpiteestä riippuen tarkastellun toimen kohdalla on voitu myös kertoa tarkemmin käytetyt laskentaoletukset ja -kaavat. Edellisten lisäksi kustannukset on allkoitu (arvio) ajankohdalle 2015–2020 vuosikohtaisesti sekä verrattu kokonaistasolla PwC:n esittämää päästövähennystä ilmastostrategiassa esitettyyn vähennykseen.

Yhdistämällä yksittäiselle toimenpiteelle arvioitu kustannus sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähennys on saatu tulokseksi yksittäisen toimenpiteen päästövähennyskustannus.

Yksittäisen toimen hintalappu per tCO₂e (arvo E) on laskettu seuraavanlaisesti:

- A = arvioitu päästövähennys (milj. tCO₂e.)
- B = toimen bruttokustannus, sisältäen nk. projektikustannukset (milj. EUR)
- C = säästetyt energiakustannukset (milj. EUR)
- D = B – C = nettokustannukset (milj. EUR)
- E = D / A = toimikohtainen vähennyskustannus (EUR/tCO₂e)

E voi olla joko positiivinen tai negatiivinen lukuarvo riippuen säästettyjen energiakustannusten suuruudesta (arvo C, joka vaikuttaa arvoon D). Mikäli säästetty energiakustannus on suurempi kuin bruttokustannus, on toimikohtainen vähennyskustannus negatiivinen. Negatiivinen arvo tarkoittaa siis sitä, että tarkasteluajanjakson aikana säästetyt energiakustannukset tuottavat enemmän hyötyä kuin toimenpiteeseen allkoidut kustannukset. Eli toimenpide säästää pitkällä ajanjaksolla enemmän kustannuksia kuin mitä se kuluttaa.

On myös huomioitava, että kaikkien toimien kohdalla energiasäästöt (arvo C) eivät välttämättä ole positiivisia. Toisin sanoen energiaa ei säästetä vaan sitä tulee kulumaan enemmän kuin nykyisessä mallissa.

Oheiseen taulukkoon on nostettu muutama esimerkki havainnollistamaan laskukaa-
vaan toteutumista.

Taulukko 7-2 Yksittäisen vähennyskustannuksen muodostuminen (PwC 2016)

Toimenpide	Kasvihuone- kaasuvähennys yhteensä milj. tCO ₂ e. A	Brutto- kustannus milj. EUR B	Säästetyt energia- kustannukset milj. EUR C	Netto- kustannukset milj. EUR D = B – C	Yksittäinen vähennys- kustannus EUR/tCO ₂ e E = D / A
Sähköajoneuvojen käytön lisääminen, toimenpiteet 70-74	4,5	1 037	2 762	-1 725	-387
Kaatopaikkojen metaanipäästöjen vähentäminen tuuletuksen avulla, toimenpide 85	11,6	107	0	107	9
Asuntokohtaiset saneeraus- aikataulut asuinrakennuksille ja muille rakennuksille, toimenpide 43	27,5	18 167	8 233	9 934	361

Raportin lopussa on avattu näiden lukujen takana vaikuttavia oletuksia ja laskukaa-
voja vielä tarkemmin. Esimerkiksi yksi sähköajoneuvojen käytön lisäämisen toimista
(toimenpide 70) on sähköajoneuvojen määrän korottaminen 1 miljoonaan kappalee-
seen vuoteen 2020 mennessä (tarkoittaen 80 000 uutta sähköajoneuvoa vuodessa).
Selvityksessä on laskettu arvioitu päästövähennys (tilanteessa, jossa tavoite on saa-
vutettu) seuraavalla laskukaavalla:

$$RedCO_2 = ErhStrom \times 3,6 \times CO_2FaktorStrom + RedDiesel \times 3,6 \\ \times CO_2FaktorDiesel + RedBenzin \times 3,6 \times CO_2FaktorBenzin$$

Laskukaavan osat on avattu tarkemmin seuraavaan listaan:

- RedCO₂ = kokonais-CO₂-päästövähennys (0,17 milj. t.)
- ErhStrom = EVElektro*ZBElektro = lisääntynyt sähkönkulutus (0,06 TWh)
- RedDiesel = EVDiesel*VD(B+D)*0,55 = säästöt dieselin käytössä (0,57 TWh)
- RedBenzin = EVBenzin*VD(B+D)*0,45 = säästöt bensiinin käytössä (0,24 TWh)
- EVElektro = sähköajoneuvokohtainen energiankulutus (0,74 TWh / milj. ajoneu-
voa)
- ZBElektro = uusien sähköajoneuvojen määrä (80 000 kpl / a)
- EVDiesel = autokohtainen dieselin kulutus (13,00 TWh / milj. ajoneuvoa)
- VD(B+D) = bensiini- ja dieselautojen syrjäytys (80 000 kpl / a)
- EVBenzin = autokohtainen bensiinin kulutus (6,54 TWh / milj. ajoneuvoa)
- CO₂FaktorDiesel = CO₂-kerroin dieselille (0,0732 milj. t / PJ)
- CO₂FaktorBenzin = CO₂-kerroin bensiinille (0,0734 milj. t / PJ).

Kertoimet RedDieselin ja RedBenzinin edessä viittaavat ajoneuvojen tämänhetkiseen polttoaineseikoitukseen: 55 % on oletettu olevan dieseliä ja 45 % bensiiniä. CO2Faktorien edessä olevat kertoimet (3,6) ovat energian yksikkömuuntokertoimia petajouleista terawattitunteihin.

Kyseisen sähköautoihin liittyvien toimenpiteen kohdalla lasketaan yhteinen kustannus neljän eri toimenpiteen kanssa, koska ne käsittelevät samaa teemaa ja menevät kustannusten osalta siis osin päällekkäin. Ympäristöministeriö on allokoanut 500 milj. EUR ajanjaksolle 2015–2020 kattamaan hallinnollisia ja tukiin liittyviä kustannuksia. Bruttokustannusten osalta (eli toimen toteutuksen kustannus ottamatta huomioon energiansäästökustannuksia) on käytetty seuraavaa laskentakaavaa (vuodelle 2015):

$$BK = ZBElektro \times ZKElektro \times \%Gew.$$

Tässä laskukaavassa käytetyt oletukset on listattu seuraavasti:

- BK = Bruttokustannukset
- ZBElektro = uusien sähköajoneuvojen määrä (80 000 kpl/v)
- ZKElektro = sähköajoneuvoista koitua lisäkustannus verrattuna diesel- ja bensiiniautoihin (2016: 3 200 EUR, 2017: 2 200 EUR, 2018: 1 800 EUR, 2019: 1 600 EUR, 2020: 1 400 EUR)
- %Gew. = sähköajoneuvojen osuus ammatillisessa käytössä (0,65 %)

Lisäksi henkilöautojen käyttöikä on arvioitu olevan 6 vuotta. Edellisiä laskukaavoja noudattaen muodostuu yhteenveto tämän toimenpiteen allokoituista kustannuksista ja kokonaisvähennyksistä, joka on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 7-3 Esimerkki sähköajoneuvojen käytön lisäämisestä, kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset ja kustannusten kehitys (PwC 2016)

Energia- ja kasvihuonekaasupäästöjen vähennys	Energiasäästöt, PwC:n arvio (TWh)	Kasvihuonekaasupäästösäästöt, PwC:n arvio (milj. t CO ₂ e.)	Kasvihuonekaasupäästösäästöt, strategian arvio
2020	3,3	0,7	0,7
Koko elinkaaren ajalta	20,0	4,5	n.a.

Kustannusten kehitys	Säästetyt energiakustannukset (milj. EUR)	Ohjelma-kustannukset (milj. EUR)	Brutto-kustannukset (milj. EUR)
2015	0,0	0,0	0,0
2016	106,4	208,0	276,4
2017	207,5	208,0	224,4
2018	304,2	201,6	203,6
2019	396,8	191,2	193,2
2020	495,7	180,8	182,8
2020 jälkeen	1 483,4	0,0	0,0
Koko elinkaaren ajalta	2 994, 1	989,6	1 080,4
Nykyarvo (2015 perusvuosi)	2 761,8	947,6	1 036,6

Kuten yllä olevista laskuesimerkeistä ja tuloksista voi huomata, yksittäisten toimenpiteiden laskumetodit ja oletukset on avattu hyvin tarkasti ja allokoitu vuosikohtaisesti. Raporttiin on myös merkitty oletuksiin käytetyt lähteet.

PwC:n selvityksessä kansantaloudellisia vaikutuksia on kuvattu yhteensä kaikkien päästövähennystoimien osalta – ei erikseen yksittäisten toimien osalta. Näihin vaikutuksiin kuuluvat mm. työllisyysvaikutukset, BKT-vaikutukset, vaikutukset tuontien energian määrään ja käyttäjähintoihin (polttoaineiden osalta) sekä kustannusten jakautuminen eri sektoreille.

Makroekonomisten vaikutusten arviointiin on käytetty Input-Output-malli GEMIOta sekä erilaisia skenaarioita. Malli perustuu Saksan tilastokeskuksen (Statistisches Bundesamt) sekä World Input Output Databasen tietoihin. Tiedot ovat vuodelta 2010, ja niistä on koostettu arviot vuosille 2015–2020. Ennustuksissa on myös pyritty käyttämään muiden instituutioiden tekemiä ennustuksia esim. sähkömarkkinoiden kehityksestä, joita silmällä pitäen on tehty arvio siitä, miten markkinat muuttuvat vuoteen 2020 mennessä ja muokattu ennustuksia näiden mukaan. Vanhan lähdedatan voi nähdä olevan yksi raportin epävarmuustekijöistä.

Päällekkäisyyksiä on pyritty ottamaan huomioon arvioinneissa siten, että kaikkia päätettyjä toimenpiteitä ei ole arvioitu vaan arvionnit on osittain yhdistetty. Esimerkiksi kaikkien sähköautoihin liittyvien toimenpiteiden kustannukset on laskettu yhteensä kaikille toimenpiteille, ei erikseen jokaiselle toimenpiteelle.

7.1.3 Yhteenveto analyysimenetelmistä

Liikennesektorilla yleisin tarkastelumenetelmä on liikennesektorin tarkastelu sektoritasolla, jota täydennetään yleisillä tasapainomalleilla (katso yhteenvetotaulukko, Taulukko 7-4). Itse liikennesektorin on yleensä mallinnettu osittaistasapanomallilla, jossa mallinnetaan teknologiavalintoja joko kuluttajatasolla tai järjestelmätasolla minimoiden kustannuksia suhteessa skenaariossa asetettuun CO₂-päästörajaan. Osittaistasapanomalleja ovat esim. VTT:n TIMES-malli, jossa on sisällytetty koko energiasektori, joten se ottaa samanaikaisesti huomioon liikenteen ja sähköntuotannon sektorikytkennät. Sektorispesifin tarkastelun lisäksi suurimmassa osassa selvityksiä on erikseen tarkasteltu vaikutuksia kansantalouteen joko YTP-malleilla tai yhdessä tapauksessa panos-tuotomallilla. Eräs vaihtoehtoinen menetelmä on sektorin sisäinen valintamallinnus, jossa kuluttajat on jaettu eri segmentteihin ja jokaisella on eri hyötyfunktio.

Perusurana on tyypillisesti liikennesektorin oletettu kehitys ilman tulevia toimenpiteitä, jotka on tuotettu erillisellä mallilla. Poikkeuksena tähän on esim. PwC:n Saksan valtiolle tekemä selvitys, jossa varsinaista perusuraa ei ole, vaan päästövähennyksiä ja kustannuksia on tarkasteltu olettamalla, että markkinoille tulee tietty lukumäärä sähköautoja (80 000 kpl/v) ja ne korvaavat tietyllä jakaumalla bensiini- ja dieselautoja. Toisin sanoen tässä esimerkissä sähköautojen yleistymisvauhti on eksogeeninen muuttuja. Perusuraa vasten vertailtavat skenaariot ovat pääsääntöisesti normatiivisia skenaarioita. Mallinnuksessa asetetaan tällöin katto vuotuisille CO₂e-päästöille ja osittaistasapainomalli ratkaisee kustannustehokkaimman ajoneuvo- ja teknologiaportfolion, jolla tavoite voidaan saavuttaa. Tällöin liikenneteknologian valinta (technology switch) on endogeeninen (mallin sisäinen) muuttuja.

Ristikkäisvaikutusten huomiointi on tapaus- ja mallikohtaista. Esim. CCC:n mallinnuksessa liikennesektorin on mallinnettu kuluttajavalintamallilla ja linkitykset muihin sektoreihin ovat eksogeenisiä. Kytkennät on mallinnettu ns. ensimmäisen kertaluvun tasolla, eli energiasektori on mallinnettu erikseen tietyllä energian kysynnän oletuksilla, ja lopputuloksen päästökerrointa käytetään syötteenä liikennesektorin malliin. Päinvastaisia esimerkkejä ovat TIMES-mallit (mm. TIMES-VTT ja TIMES-Sweden), joissa mallinnetaan koko energiasektori ja joissa sähkön päästökerroin on mallinnusmuuttuja. Intertemporaalisia vaikutuksia ei mallinnetta sellaisenaan. Teknologiakehitys mallinnetaan syötteenä annettavana oppimiskäyränä, eikä esim. T&K-heijastevaikutuksia

tyypillisesti mallinnetta (mikä pienissä maissa lienee turvallinen oletamus). Kompensaatiovaikutukset on huomioitu suurimmassa osassa mallinnuksista käyttämällä YTP-malleja (yleinen tasapainomalli), joilla voidaan mallintaa esim. kysyntäjousto suhteellisen suoraviivaisesti. Tyypillisesti tosin YTP-malleja käytetään vasta "lopuksi" eli sektori mallinnetaan ensin erikseen, minkä jälkeen arvioidaan laajempia kansantaloudellisia vaikutuksia YTP-malleilla.

Kustannuksista huomioidaan tyypillisesti vain suorat teknologiakustannukset. Kustannusten kohdentumista on tarkasteltu hieman eri menetelmin. Yleisin tapa on laskea puhtaasti teknologiakustannukset tai kansantaloudelliset kustannukset kokonaisuudessaan, tai monessa tapauksessa molemmat. Teknologiakustannukset tarkoittavat tässä suoraan vaihtoehtoisten teknologioiden kustannuksia verrattuna perusuraan, eli yleisimmin sähköauton elinkaarikustannukset vs. polttomoottoriautojen kustannukset kerrottuna käyttöön otettujen sähköautojen määrällä. Kustannukset on tyypillisesti diskontattu sosiaalisella diskonttauskertoimella. Tulokset esitetään joko EUR/tCO_{2e} tietylle teknologialle, sektoritason kokonaiskustannuksina tai prosentteina BKT:sta.

Taulukko 7-4 Yhteenveto liikennesektorin tarkasteluista, tärkeimmät raportit

Suomi Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman vaikutusarviot (Valtioneuvoston kanslia, 2017)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> VTT:n kehittämä ALIISA-mallin perusura, sisältää mm. liikenneviraston tieliikenne-ennusteen.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Päästörajoitettu kustannusoptimiskenaario, jossa on asetettu katto vuotuisille päästöille. Malli ratkaisee kustannustehokkaan teknologiapaketin päästörajan saavuttamiseksi. Liikennesektori mallinnettu osana koko energiajärjestelmää.
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> Osittaistasapainomalli, jolla lasketaan kustannusoptimia energiajärjestelmälle. Mm. sektorikytkentä sähköjärjestelmän kanssa osana mallia. ALIISA-mallilla (staattinen malli) lasketut päästövaikutukset. Koko toimenpidepaketin vaikutuksia kansantalouteen on arvioitu erillisellä mallilla (FINAGE).
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Mallinnettu sekä järjestelmätasolla että kansantaloudellisella tasolla. Herkkyystarkastelu teknologian hinnalle ja polttoaineiden hinnoille. Käytetty eri diskonttauskorkoja (4–10 %).
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Järjestelmäkustannukset EUR/CO_{2e} valituille toimenpiteille. Kokonaiskustannukset EUR/v koko toimenpidepaketille. MAC-käyrä valituille toimenpiteille. %-muutos BKT:n verrattuna.
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> Kvalitatiivinen tarkastelu.

UK Sectoral scenarios for the Fifth Carbon Budget – Technical report (CCC, 2015b) & Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential in the Scottish Transport Sector From Recent Advances in Transport Fuels and Fuel Technologies (Element Energy, 2017)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> • Liikenneministeriön ennusteet.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> • Molemmissa selvityksissä henkilöliikenteen mallinnukseen on käytetty Element Energyn kehittämää valintamallia, mikä mallintaa ostajien päätöksiä tietyin oletuksin heidän hyötyfunktioistaan. • Sähköautojen käyttöönottoskenaario on luonteeltaan prediktiivinen, eli malliin syötetään tietyt alkuoletukset, joiden perusteella malli ennustaa teknologian käyttöönottoa. • Raskas liikenne mallinnettu suoraviivaisella skenaariolla (eli oletettu mahdollinen markkinaosuuden kehitys).
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> • Element Energyn luoma kuluttajapäätösmalli, jossa kuluttajien päätöksentekoa mallinnetaan heidän arvioitun maksuvalmiuden perusteella (Willingness to Pay). Maksuvalmiusarvio perustuu 2000 uuden auton ostajan haastatteluun. • Malli huomioi myös ei-taloudelliset tekijät päätöksenteossa, kuten eri kuluttajaryhmät ja heidän preferenssinsä. • Hinnat, teknologian kehitys ja sektorikytkennät ovat eksogeenisiä muuttujia.
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> • Kustannusten kohdentuminen yksilöille on huomioitu itse mallinnuksessa, mutta sitä ei ole erikseen esitetty tai laskettu lopputuloksissa.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> • Muodossa £/tCO₂ (ei ekv.) per teknologia vuonna 2030 ja kokonaiskustannukset suhteessa perusuraan. Herkkyystarkastelu kokonaiskustannuksille eri polttoaineiden ja teknologioiden hinnoilla. • Itse kustannustehokkuus laskettu investointilaskelmana.
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> • Kvalitatiivisesti arvioitu vaikutukset ilmanlaatuun ja työllisyyteen.

Saksa Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (PwC, 2016)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> • Tutkimuksessa selvitetään kaikkien kvantifioitavissa olevien päästövähennystoimenpiteiden päästövähennyspotentiaali sekä kustannustehokkuus. Perusura riippuu laskettavasta toimenpiteestä. • Esimerkissä, jossa lasketaan sähköautojen määrän lisääntymistä, on tehty oletus kuinka paljon sähköautot korvaavat bensiini- ja diesel-autoja tarkasteluajanjakson aikana. Perusura ei ota kantaa autojen kokonaismäärään, joten tästä ei voida päätellä, oletetaanko sähköautojen korvaavan käytössä olevia autoja vai uusia autoja.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> • Esimerkissä, jossa lasketaan sähköautojen määrän lisääntymistä, on oletettu, että sähköautoja tullaan valmistamaan lisää siten, että sähköautojen lukumäärä kasvaa 80 000 kpl vuodessa. Luku perustuu Saksan valtion asettamiin tavoitteisiin. Kustannuksia laskettaessa on oletettu, että sähköauton kokonaiskustannus tippuu vuosi vuodelta. Kustannuksia on verrattu dieselauton kokonaiskustannuksiin. Päästöjen kohdalla on tarkasteltu vain auton energiantuotantoa eikä esimerkiksi tuotannosta aiheutuvia päästöjä. Elinkaarena on käytetty 6 vuotta, joka on Saksassa keskimääräinen auton käyttöaika. Sähköautojen latausinfrastruktuurin elinkaarena on käytetty 8 vuotta.
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> • Yksittäismallinnus kaikkien toimenpiteiden kohdalla. • Toimenpiteiden päällekkäisyys liikennesektorilla (esimerkiksi sähköautojen lisääntyminen) on huomioitu laskemalla päästövähennykset vain yhdelle toimenpiteelle – ei jokaiselle samaa aihetta käsittelevälle toimenpiteelle erikseen.

Saksa Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (PwC, 2016)	
	<ul style="list-style-type: none"> • Kaikki muuttajat eksogeenisiä. • Dynaamisia vaikutuksia ei mallinnettu. • Ei mallinnettu mahdollisia muita epäsuoria vaikutuksia.
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> • Nettokustannukset on laskettu vähentämällä energiansäästöstä syntyneet kustannukset vaadittavan tuen määrällä. • Arvioitu erikseen ohjelmakustannuksia valtionhallinnolle. • Kansantaloudelliset kustannukset on arvioitu erikseen panos-tuotosmallilla, ja kansantaloudellisia vaikutuksia on arvioitu koko toimenpidepaketille.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> • Eri toimenpiteiden tulokset on esitetty erikseen CO₂e-päästöjen osalta vuonna 2020 ja koko elinkaaren osalta. Kustannukset (milj. EUR) on esitetty vuositason vuosien 2015–2020 osalta, sekä yhteenvetona vuoden 2020 jälkeiselle ajalle ja koko elinkaaren ajalle. Kustannuksista on eroteltu säästetyt energiakustannukset, ohjelmakustannukset (hallinnolliset kustannukset) ja bruttokustannukset. • Jokainen kvantifioitu toimenpide on myös esitetty erillisessä taulukossa, jossa on laskettu kustannussäästö yksikössä EUR/tCO₂e.
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> • Ei tarkastella erikseen yksittäisille toimenpiteille vaan lasketaan vaikutuksia esim. työllisyyteen ja BKT:een kokonaisuuden osalta.

Ruotsi Modellanalyser av svenska klimatmål (Copenhagen Economics, 2016)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> • Ruotsissa on arvioitu olevan päästösektorin ulkopuoleisia päästöjä 29 miljoonaa tonnia vuonna 2030. Näitä päästöjä tulee laskelmien mukaan vähentää 17–23 miljoonaa tonnia riippuen vuoden 2045 oletetusta päästöurasta. Näistä päästöistä 80 % voi olla tarvetta vähentää liikennesektorilla. Tämän vuoksi liikennesektorin päästökehitys määrittelee pitkälti millaisiin tuloksiin ilmastotavoitteissa päästään.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> • 12 eri skenaariota, joiden avulla arvioitu polttoaineverotuksen vaikutusta
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> • Kaksi erillistä mallinnusmenetelmää: TIMES-Sweden- ja EMEC-malli. • TIMES-Sweden on osittaistasapainomalli ja perustuu samaan mallinnusjärjestelmään kuin VTT:n käyttämä TIMES-malli. • EMEC on yleisen tasapainon malli (YTP-malli). • Poikkeuksellisesti YTP-mallia on käytetty arvioimaan toimenpiteiden kustannustehokkuutta, ei kansantaloudellisia vaikutuksia.
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> • Laskettu ainoastaan koko kansantaloudelle aiheutuvia kustannuksia.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> • Muutoksen aiheuttama vaikutus kansantaloudelle, % BKT:sta.
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> • Ei ole tarkasteltu.

Suomi Cost-efficient emission reduction pathway to 2030 for Finland. Opportunities in electrification and beyond (Sitra, 2018a)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Raporttia varten on muodostettu ns. business-as-usual-skenaario, jolla nykytrendin oletetaan jatkuvan.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Asetettu CO₂-päästöraja vuodelle. Uusautohankintaa rajoitettu tiettyyn määrään.
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> Osittaistasapainomallinnus, joka etsii ratkaisee kustannustehokkaimman teknologiamiksin suhteessa CO₂-päästörajaan.
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Laskettu teknologia- ja sektorikustannuksia. Käytetty sosiaalista diskonttaus korkoa (4 %). Kustannuksia ei ole esitetty yksilötasolle, mutta mallinnuksessa on huomioitu yksilöiden kustannukset.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> MAC-käyrä, jossa esitetty EUR/tCO₂e kustannukset teknologioittain.
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> Muita hyötyjä ei ole tarkasteltu.

Iso-Britannia Intertemporal issues and marginal abatement costs in the UK transport sector (Kesicki, 2012)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Referenssioletuksilla mallinnettu skenaario.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Viisi eri skenaariota perusuran lisäksi: kolme polkuriippuvuusskenaariota ja kaksi skenaariota eri diskonttauskoroilla. Polkuriippuvuusskenaarioissa säädetty hiilidioksidiveron käyttöönottoajankohtaa.
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> Osittaistasapainomalli UK MARKAL. MARKAL on geneerinen energijärjestelmän mallinnukseen kehitetty osittaistasapainomalli. TIMES-mallit ovat MARKAL-mallin seuraava kehitysaskel. Mallinnuksessa tehty herkkyystarkastelu polkuriippuvuuden ja diskonttauskoron suhteen.
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Laskettu teknologia- ja sektorikustannuksia. Useampi eri diskonttauskorko, 5 % perusurassa ja 3,5 % sekä 10 % herkkyysskenaarioissa.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> MAC-käyrä jokaiselle skenaariolla, jossa esitetty EUR/tCO₂e kustannukset.
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> Muita hyötyjä ei ole tarkasteltu.

Ruotsi KLIMATKLIVET En utvärdering av styrmedlets effekter (WSP, 2017)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Jokaista toimenpidettä on tarkasteltu erikseen ja arvioitu olisiko se tapahtunut ilman tukia.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Ei varsinaisia skenaarioita, vaan toimenpiteen kustannustehokkuutta arvioitu toimenpide kerrallaan (21 toimenpidettä) huomioiden kullekin toimenpiteelle myönnettyt tuet.
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> Laskettu päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuutta ex-post ja sitä onko erilaisia tukia ohjattu kustannustehokkaisiin kohteisiin. Päästövähennykset perustuvat alkuperäisiin Ympäristöministeriön käyttämiin arvioihin. Kustannustehokkuusanalyysi on käytännössä investointilaskentaa. Valtion tukien määrä pohjautuu tilastoituihin tukiihin.
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Toimenpidekohtaiset kustannukset, mukana huomioitu valtion maksama tuki, muuten ei varsinaista kustannusten kohdentumista.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> SEK (investointikustannus)/kgCO₂, annettu tuki kr/kgCO₂e.
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> Arvioitu myös muita hyötyjä, kuten työllisyysvaikutuksia.

Ruotsi Miljö, ekonomi och politik (Konjunktur Institutet, 2017)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Konjunktur institutetin EMEC-mallin perusura, tuotettu EMEC-malliilla.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Kolme eri skenaariota, joilla pyritään arvioimaan ilmastopolitiikan kustannuksia. 1) Ruotsi täyttää EU:n asettaman ehdon ja käyttää ylimääräisiä mekanismeja, kuten päästöoikeuksien ostamista muista EU-maista saavuttaakseen Ruotsin tavoitetason, 2) saavutetaan 2030-tavoitteet hyödyntämällä lisämekanismeja täysmääräisesti ja 3) ei huomioida lisämekanismeja, kaikki päästövähennykset tapahtuvat Ruotsin ESR-sektorilla (liikenne, kevyt teollisuus, asuminen ja palvelut).
Menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> EMEC-mallia on käytetty arvioimaan toimenpiteiden kustannustehokkuutta sekä kansantaloudellisia vaikutuksia. Mallinnettu veromuutoksen vaikutusta autokantaan: fossiilisten polttoaineiden kallistuessa autojen kuljettajat päättävät vaihtaa energiatehokkaampiin autoihin tai autoihin, jotka käyttävät polttoaineita joihin CO₂-vero ei osu. EMEC-mallissa ei ole mallinnettu esim. sähköntuotantoa, minkä vuoksi oletukset sähkön päästökertoimesta on otettu toisesta mallista. EMEC-mallia on käytetty myös Copenhagen Economics (2016) selvityksessä (katso yllä).
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Arvioitu pelkästään kansantaloudellisia kustannuksia.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Kustannukset SEK/CO₂ valituille sektoreille MAC-käyränä, niin että päästövähennemä saavutetaan veroa kasvattamalla Esitetty myös kansantaloudelliset kustannukset % BKT:sta
Muut hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> Ei ole tarkasteltu.

7.1.4 Esimerkkilaskenta liikennesektorilla

Liikennesektorin esimerkkilaskenta liittyy vähäpäästöisen liikenteen edistämiseen. Laskennan perustana on suoraviivainen laskenta, jossa verrataan bensiiniautojen perusuran kehitystä vaihtoehtoiseen skenaarioon, jossa saavutetaan 250 000 sähköautoa vuoteen 2030 mennessä. Esimerkkilaskenta on staattinen yksittäistarkastelu.

Taulukko 7-5 Keskeiset laskentaoletukset

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018, ellei toisin mainittu	Kommentit ja epävarmuustekijät
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> VTT:n ALIISA-mallin perusura (~123 000 sähköautoa vuonna 2030) 	<ul style="list-style-type: none"> VTT:n ylläpitämä malli, jota päivitetään kerran vuodessa. Käyttökelpoisin tällä hetkellä käytössä oleva perusura-arvio Suomen osalta. Perusura-arvion taustalla on lukuisia oletuksia, mm. investointien ja hintakehityksen suhteen. Näitä ei ole esitetty läpinäkyvästi, mikä hankaloittaa perusuran käyttöä laskennassa. Vaihtoehtoskenaariossa joudutaan tekemään omat oletukset investointi- ja käyttökustannuksille.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Oletettu 250 000 sähköauton tavoitteen täyttyvän. Tasainen kasvu-% vuoteen 2030, ei käyttöönottomallinnusta Oletettu, että sähköautot korvaavat uusia bensiiniautoja suhteessa 1-1 Ei vaikutusta liikennesuoritteiden määrään 	<ul style="list-style-type: none"> Oletus on huomattavasti laskentaa yksinkertaistava (ei tarvetta osittaisapainomalleille), mutta samalla tekee laskennasta epätarkempaa. Tässä esimerkkilaskennassa ei tehdä vertailua vaihtoehtojen välillä, vaan pikemminkin lasketaan jo päätetyn toimenpiteen kustannus. Liikennesuoritteet muuttuvat todellisuudessa ennen kaikkea liikkumisen muuttuvan kustannuksen mukaan, minkä huomioimiseksi vaaditaan YTP-mallinnus.
Teknologiaoletukset	<ul style="list-style-type: none"> Polttomoottoriautojen energiatehokkuus paranee noin 2,3 % vuodessa, sähköautoilla parannus noin 1 % Polttomoottoriautojen kulutus 7,3 l/100 km (2019) Sähköautojen kulutus 0,2 kWh/km (2019) Elinkaari 9 v 	<ul style="list-style-type: none"> Energiatehokkuusarviot perustuvat AEA (2012) -arvioihin, eivätkä välttämättä ole linjassa perusuran arvion kanssa. Autojen energiakulutuksen lähtötaso on VTT:n ALIISA-mallin oletus. Elinkaarioletus perustuu työpajoissa esitettyyn arvioon (8–10 vuotta).

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018, ellei toisin mainittu	Kommentit ja epävarmuustekijät
Päästökerroinoletukset	<ul style="list-style-type: none"> Bensiiniautojen päästökerroin 159 g/km Sähköajoneuvojen päästökerroin vuonna 2019 39 g/km Sähkön päästökerroin 160 \pm 95 g/kWh Akkujen valmistuksesta aiheutuva päästökerroin 50 g/kWh käyttöä (ICCT, 2018) 	<ul style="list-style-type: none"> Bensiiniautojen päästökerroin VTT:n ALIISA-mallista, sähköautojen päästökerroin on laskettu sähkön päästökertoimen avulla. Sähkön päästökerroin on vuoden 2018 tilastos-ta, ja vuoden 2030 sähkön päästökerroin on Pöyryn oletus. Sähköauton päästökerroin (per km) on laskettu sähköauton arvioidun energiakulutuksen (per km) perusteella.
Kustannusoletukset	<ul style="list-style-type: none"> Investointikustannukset <ul style="list-style-type: none"> Sähköautot 38.5 kEUR Bensiini 20 kEUR Sähköauton investointikustannukset laskevat tasolle 26 kEUR vuonna 2030 Raakaöljyn hinta 70-115 \$/bbl (2019-2030) Sähkön kokonaishinta 138-160 EUR/MWh Akun hyötysuhde 90 % Diskonttauskorko 3,5 % 	<ul style="list-style-type: none"> Investointikustannukset perustuvat VTT:n teke-miin selvityksiin, sähköauton hankintahintaan lisätty 2000 EUR latausinfrastruktuurihintaa (ko-tilatauspistoke). Raakaöljyn hinta ja pörssisähkön hinta ovat energia- ja ilmastostrategian taustaskenaariosta. Diskonttauskorko on valittu yleinen sosiaali-nen diskonttauskorko.

Itse laskenta on tehty suoraviivaisesti siten, että sähköautojen on oletettu tasaisesti korvaavan uusmyynnin polttomoottoriautoja siten, että 250 000 sähköauton tavoite saavutetaan (tässä vaiheessa mukaan ei ole oletettu ladattavia hybridi-autoja). Laskennassa ei ole erikseen mallinnettu käyttöönottoskenaariota, mutta se pohjautuu olemassa oleviin tavoitteisiin, jotka toisaalta perustuvat käyttöönottomallinnukseen.

Päästövähennys on laskettu vertaamalla sähköautojen ja polttomoottoriautojen päästökertoimia vuositasolla per auto, kertomalla nämä sähköautojen lukumäärällä vs. perusura ja summaamalla päästövähennykset laskentavuosien yli:

$$\text{Päästövähennys} = \sum (P_{\text{Polttomoottori}} - P_{\text{Sähkö}}) \times (n_{\text{sähkö,sken}} - n_{\text{sähkö,perusura}}),$$

jossa P on päästökerroin ja n on lukumäärä. Kustannukset on laskettu vertaamalla sähköautojen hankintakustannuksia ja käyttökustannuksia polttomoottoriautojen kustannuksiin. Jokaisena vuotena laskentaskenaariossa syntyy kustannuksia sähköauton ja polttomoottoriauton hankintakustannusten erotuksen verran kerrottuna sähköautojen lukumäärällä, ja tämän jälkeen syntyy käyttökustannussäästöjä 9 vuoden ajan bensiinin ja sähkön hintaerotuksen verran. Näiden perusteella lasketaan kustannusten nettonykyarvo:

$$NPV (Kustannukset) = \sum \frac{I_i + K_i}{(1+p)^i}$$

Jossa I on investointikustannukset vuonna i, K on käyttökustannukset vuonna i, ja p on diskonttokorko.

Kustannustehokkuus on saatu jakamalla kokonaispäästövähennykset kustannusten nettonykyarvolla. Laskennan perusteella sähköautojen päästövähennyksen kustannustehokkuus on noin 0 EUR/tCO₂e, mikä on huomattavan vähän. Luvun pienuus johtuu pitkälti siitä, että käytetyillä alkuoletuksilla sähköautosta tulee sellaisenaan kannattava vaihtoehto ennen vuotta 2030. Vertailun vuoksi VTT:n tekemä arvio on noin 50 EUR/ tCO₂e (Koljonen ym. 2017) ja McKinseyn arvio on noin -100 EUR/ tCO₂e (Granskog ym 2018). Pöyryn esimerkkilaskelma on avattu vielä tarkemmin liitteessä 3.

Laskennassa on tehty huomattava määrä oletuksia. Perusura ja tulevaisuuden kehitystä kuvaava skenaario eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä perusuran oletuksia ei ole kaikilta osin julkisesti saatavilla. Käyttööntomallinnuksen puutteen vuoksi lopputulosta ei voida käyttää tavoitteen luomiseen. Sen vuoksi liikennesektorilla täytyy tehdä käyttööntomallinnuksia usean teknologian ja monimutkaisten riippuvuussuhteiden vuoksi. Niiden tekeminen suoraviivaisella laskennalla on haastavaa ja kirjallisuuskatsauksen sekä työpajojen perusteella osittaistasapainomallit ovat suositeltavia menetelmiä.

Edellä kuvatun mukaisesti tarvittavien oletuksien määrä on jo yksinkertaisessa laskennassa suuri. Tyypillisesti julkisesti saatavilla olevissa selvityksissä laskentaoletuksia ei ole kuitenkaan avattu tarkasti, vaikka laajemmat tarkastelut vaativat lähtökohtaisesti enemmän oletuksia. Tämän vuoksi eriävien tulosten vertailu eri selvitysten välillä ei ole mahdollisia.

Laskennassa ei ole otettu huomioon erilaisia kansantaloudellisia tai epäsuoria vaikutuksia, jotka laskentaesimerkin tilanteessa ovat relevantteja. Esimerkiksi liikennesuoritteiden määrä on oletettu vakioksi, vaikka todellisuudessa se riippuu liikkumisen muuttuvasta kustannuksesta, joka on sähköautoilla huomattavasti matalampi kuin polttomoottoriautoilla. Lisäksi laskennassa ei ole huomioitu infrastruktuurin rakennuskustannuksia, jotka voivat osaltaan kasvattaa kustannusta. Lisäksi laskennassa on käytetty sosiaalista diskonttokorkoa (3,5 %), kun todellisuudessa kuluttajat arvioivat kustannuksia todennäköisesti suuremmalla diskonttokorolla. Tämä saa toimenpiteen näyttämään laskennassa kustannustehokkaammalta, kuin miltä se todellisuudessa näyttää kuluttajille.

Lopputulos viittaa siihen että sähköautot voisivat olla hyvin kustannustehokas vaihtoehto päästövähennyksen saavuttamiseksi. Laskenta tosin ottaa huomioon vain suorat

teknologiakustannukset, eikä huomioi erilaisia käyttöönottoa hidastavia tekijöitä kuten infrastruktuurin puute.

7.2 Rakennusten erillislämmitys

7.2.1 Rakennusten erillislämmityssektori päästövähennysten laskentanäkökuulmasta

Rakennusten erillislämmitys on merkittävä kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja useassa maassa, minkä vuoksi siihen liittyviä päästövähennysten kustannustehokkuustoimia on pohdittu laajalti. Tyypillisesti ohjaukeinoet pyrkivät vähentämään yksittäisten asuntojen energiankulutusta paremman energiatehokkuuden kautta. Keinoja saavuttaa parempi energiatehokkuus ovat esimerkiksi erilaiset saneerausta edistävät toimet. Toinen tyypillinen ohjaukeino on vaikuttaa päästöjen määrään joko tekemällä uusiutuvan energian teknologioista houkuttelevampaa tai nostamalla fossiilisen energian hintoja esimerkiksi verotuksen kautta.

Vaikka toimenpiteitä ja ohjaukeinoja on monia, rakennusten erillislämmityssektorin päästövähennystoimien kustannuslaskennassa toistuu tyypillisiä piirteitä, joita käsitellään alakappaleessa 7.2.2. Laskennassa tehdään lähtökohtaisesti hyvin paljon erilaisia olettamuksia, mikä aiheuttaa laskentaan ja lopputuloksen luotettavuuteen jo lähtökohtaisesti paljon epävarmuuksia. Näihin yksityiskohtiin pureudutaan tarkemmin alakappaleessa 7.2.4. ja esimerkkilaskennan avulla alakappaleessa 0.

Rakennussektorin laskennan hyvänä puolena on se, että tyypillisesti rakennusten määrästä ja energiankulutuksesta löytyy julkisesti avointa, historiallista perusdataa. Yksityiskohtaisempien asioiden mallinnukseen sen sijaan voi olla vaikea löytää tarkkoja, aukottomia tilastoja. Esimerkiksi Suomessa rakennusten omistajatahoa ei seurata kovin tarkalla jaottelulla eikä datasta pysty erottamaan tarkkoja lämmön kulutustietoja eri omistajatahoille. Tilastot eivät myöskään aina rekisteröi viimeisimpiä muutoksia. Esimerkiksi Tilastokeskus on tällä hetkellä kehittämässä mallinnustaan liittyen lämmitysmuotojen vaihtamiseen, jotta nämä tiedot tallentuisivat tulevaisuudessa paremmin rekistereihin.

Kun tarkastellaan eri sektorien välisiä yhteyksiä, rakennussektori kytketään monesti energiasektoriin, mikä onkin luontevaa alojen päällekkäisyyksien vuoksi. Jos esimerkiksi lämpöpumppujen määrä lisääntyy, kasvaa myös sähköverkon kuormitus. Lämpö-

pumppujen määrä saattaa vaikuttaa myös sähkön hintaan. Tämä onkin hyvä muistutus siitä, että tarkasteluissa ei voi keskittyä pelkästään projektikustannuksiin tai toimenpiteiden toteuttamisesta aiheutuviin kustannuksiin, vaan myös toimenpiteen mahdollisiin seurannaiskustannuksiin. Mikäli toimenpiteet koskevat biopolttoaineiden tai biokaasun vaikutuksia, sektorien päällekkäisiä vaikutuksia on myös muun muassa maatalouteen ja teollisuuteen. Huomioitavaa on kuitenkin, että rakennussektoria koskevissa selvityksissä harvoin otetaan huomioon laajalti ristikkäisvaikutuksia muihin sektoreihin muuten kuin polttoainehintojen kustannusten herkkyytarkastelun osalta.

Alla oleva taulukko listaa vielä yhteen esimerkkejä keskeisistä rakennusten erillislämmityssektoriin liittyvistä vaikutuksista.

Taulukko 7-6 Esimerkkejä keskeisistä laskentaan liittyvistä vaikutuksista

Vaikutus	Esimerkki
Intertemporaaliset	Kevyen polttoaineen ja sitä kautta öljylämmityksen hinnan tämänhetkinen korotus saattaa johtaa siihen, että seuraavan kerran kun lämmitysmuodon vaihtaminen tulee ajankohtaiseksi, asukas valitsee toisen lämmitysmuodon. Tai asukas vaihtaa öljylämmityksestä halvempaan lämmitysmuotoon jo aikaisemmin kuin oli alun perin suunnitellut. Vaikka vaikutus ei tapahdu saman tien, sillä on ohjaava vaikutus tulevaisuuteen.
Polkuriippuvuudet	Mikäli tällä hetkellä halutaan tukea väliaikaiseksi tarkoitettua lämmitysteknologiaa, se ohjaa kyseisen lämmitysteknologian määrän kasvuun. Lämmitysmuodon valinta on usein pitkäaikainen investointi, mikä vaikuttaa siihen, että väliaikaisratkaisusta tuleekin pitempikestoisempi kuin oli ehkä tarkoitettu.
Kompensaatiovaikutukset	Mikäli uusi, ympäristöystävällisempi lämmitysmuoto, esimerkiksi maalämpöpumppu, on asukkaalle halvempi, asukkaan pitää päättää mihin käyttää jäljelle jäävät ylimääräiset rahat. Voi olla, että asukas päättää käyttää rahat ilmastolle haitallisiin toimiin, kuten lisääntyneisiin ulkomaanmatkoihin. Näin ollen kompensatiovaikutus syö osan lämmityssektorilla tapahtuneista päästövähennyksistä. Myös kustannusten kohdentumista muihin aloihin on vaikea ohjata.
Sektorien väliset vaikutukset	Rakennusten erillislämmityssektorilla on ristikkäisvaikutuksia etenkin energiasektorin kanssa. Esimerkiksi lämmitysjärjestelmän vaihdossa lämpöpumpuiksi tai sähkölämmitykseksi päästövähennyksen määrä on vaikuttaa suoraan sähkön päästökerroin. Kaikilla polttoöljyn kohdistuvilla toimilla on vaikutus myös muun muassa työkonesektoriin. Biopolttoaineiden ja biokaasun lisäämisellä sen sijaan on vaikutuksia esimerkiksi maatalous- ja teollisuussektoriin. Toimenpiteillä voi olla myös vaikutusta huoltovarmuuteen. Esimerkiksi öljylämmityksen vähentäminen pienentää myös logistiikkakapasiteettia, mikä puolestaan vaikuttaa huoltovarmuuteen. Myös maalämpöpumppujen lisääminen vaikuttaa sähköverkon kuormitukseen ja asettaa paineita sen ja erilaisten joustomekanismien kehittämiseen.
Toimenpiteiden päällekkäiset vaikutukset	Esimerkiksi Suomessa KAISUn toimenpiteet tähtäävät öljylämmityksen vähentämiseen sekä verotuksen että muiden toimenpiteiden kautta. Mikäli öljylämmitys vähenee, on vaikea arvioida mikä yksittäinen toimi on vaikuttanut eniten lopputulokseen. Päällekkäisten vaikutusten arviointi ja tuplalaskennan poissulkeminen on vaikeaa myös laskennassa.

Rakennusten lämmitysratkaisuilla on ylläolevan taulukon esimerkkien lisäksi vaikutuksia myös muista näkökulmista. Yksi tärkeimmistä näkökohdista on rakennusten erillislämmityksen vaikutus sosio-ekonomisiin kysymyksiin. Koska asuminen ja sitä kautta rakennukset ovat keskeisimpiä yhteiskunnan osia, tulee eri ohjauskeinoissa ottaa huomioon niiden vaikutukset eri yhteiskunnan ryhmiin.

Tähän projektiin liittyvässä rakennusten erillislämmityksen työpajassa nousi hyvin vahvasti esiin se, että KAISUssa määritelty rakennusten erillislämmityssektorin lisätoimenpiteet ovat voimakkaasti sidoksissa sosiaalipolitiikkaan. Sosiaalipolitiikan vaikutukset näkyvät esimerkiksi maksukyvyssä ja myönnettyissä tuissa. Työpajan osallistujat esittivät, että tukivolyymi esimerkiksi energiasektorilla vaikuttaa sosiaalipolitiikan tukivolyymeihin ja -tarpeeseen. Kustannusten nousu ei kohdistu tasaisesti kaikkiin sosioekonomisiin ryhmiin. Esimerkiksi ne rakennukset, joihin maalämmön asentaminen on jo ollut erityisen järkevää ja kustannustehokasta ja/tai joiden omistajilla on paljon resursseja ja maksukykyä tehdä tällaisia investointeja, ovat todennäköisesti jo vaihtaneet lämmitysjärjestelmänsä. Tästä johtuen loput investoinnit tulevat todennäköisesti keskittymään heikommassa asemassa oleviin kuluttajiin, mikä vaikeuttaa heidän rahallista tilannettaan.

Myös erilaiset verotukseen tehtävät ohjauskeinot ja ratkaisut vaikuttavat vääjäämättä useisiin eri yhteiskunnan ryhmiin. Tämän vuoksi seurannaisvaikutuksia pitää analysoida tarkkaan ennen ohjauskeinojen toimeenpanoa.

7.2.2 Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta rakennusten erillislämmityssektorilla

Rakennusten erillislämmityksen hiilidioksidipäästöjen suuruutta ja päästövähennystoimien kustannuksia on arvioitu eri maissa usean pienemmän ja isomman kokoluokan hankkeissa eri menetelmin. Yhtä selkeää menetelmää ei kuitenkaan ole kehitetty ja myös menetelmissä käytetyt määritelmät vaihtelevat. Laskennassa huomioitavat seikat ja laskennan monimutkaisuus sekä avoimuus eroavat projektien välillä.

Seuraavaksi on kuvattu rakennusten erillislämmityssektorin päästövähennystoimien kustannustehokkuuden mallinnusta ja laskentaa Saksassa ja Isossa-Britanniassa, joiden päästövähennystoimien kustannustehokkuuden laskentamalleista pyrittiin löytämään hyviä käytäntöjä ja esimerkkejä.

Saksa, PwC (2016)

Saksan ilmastostrategioihin liittyvissä raporteissa ison linjan metodologia on yleensä kaikille sektoreille samanlainen, eli arviointitapaa ei ole muutettu sektorikohtaisesti. Monesti selvityksissä kuitenkin yksittäisten ohjauskeinojen arviointi ja laskentaoletukset ovat hyvin yksilökohtaisia eikä niitä voida yleistää tai yhdistää muihin toimenpiteisiin tai tehdä sektorikohtaisia yleistyksiä. Pääsääntöisesti metodit on avattu hyvin ja jopa yksityiskohtaisia laskukaavoja ja laskentaoletuksia on listattu selvityksiin.

Tarkemmin yksittäisiin laskentametodeihin pureutuva raportti Saksassa on PwC:n vuonna 2016 valmistelema arviointi ”Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, Abschlussbericht”, joka on tehty Saksan ympäristöministeriölle. Tässä raportissa avataan hyvin kattavasti laskutapoja sekä metodologia päästövähennystoimien vaikutusten arvioinnista yksittäisten toimenpiteiden osalta. Selvityksessä keskitytään Klimaschutz 2020-strategiassa päätettyjen poliittisten toimien taloudellisten ja ekologisten vaikutusten arviointiin.

PwC:n raportti tarkastelee hyöty–kustannus -näkökulmasta jokaisen toimenpiteen bruttokustannusta, hallinnollista kustannusta / ohjelmakustannusta, säästettyjä energiakustannuksia ja nettokustannuksia (bruttokustannus vähennettynä säästetyillä energiakustannuksilla) vuosikohtaisesti.

PwC:n raportissa on eroteltu päästövähennysten ja kustannusten määrät sekä laskentamenetelmät toimenpidekohtaisesti. Yksi esimerkki rakennuksiin liittyen on arvio verotuen vaikutuksista energiatehokkaiden saneerausten lisääntymiseen. Toimenpiteen kohdalla on arvioitu, että saneerausaste voisi nousta 0,5 % toimenpiteen seurauksena. Toimenpiteeseen liittyvässä laskelmassa on oletettu mm. keskimääräinen asunon ominaiskulutus, pinta-ala ja asuntojen lukumäärä per rakennus. Toimenpiteen kustannuksista on arvioitu, että verotuki kustantaa valtiolle 1 650 miljoonaa euroa. Lisäksi kansantaloudelle (lähinnä kotitalouksille) tulee kustannuksia saneerauksien toteuttamisesta, joista on laskettu arviot toimenpiteen kohdalla.

Yhdistämällä yksittäiselle toimenpiteelle arvioitu kustannus sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähennys, on saatu tulokseksi yksittäisen toimenpiteen päästövähennyskustannus. Lopussa kokonaispäästövähennysmäärä ja -kustannus on saatu summamalla kaikkien toimenpiteiden lukumäärät yhteen. Toimenpiteestä riippuen tarkastellun toimenpiteiden kohdalla on voitu myös kertoa tarkemmin käytetyt laskentaoletukset ja -kaavat. Edellisten lisäksi kustannukset on allokoitu (arvio) ajankohdalle 2015–2020 vuosikohtaisesti sekä kumulatiivisesti koko toimenpiteen elinkaaren ajalta. Selvityksessä on myös verrattu kokonaistasolla PwC:n esittämää päästövähennystä ilmastostrategiassa esitettyyn vähennykseen.

PwC:n selvityksessä kansantaloudellisia vaikutuksia on kuvattu yhteensä kaikkien päästövähennystoimien osalta, ei erikseen yksittäisten toimien osalta. Näihin vaikutuksiin kuuluvat mm. työllisyysvaikutukset, BKT-vaikutukset, vaikutukset tuontien energian määrään ja käyttäjähintoihin (polttoaineiden osalta) sekä kustannusten jakautuminen eri sektoreille.

Tuplalaskentaa on rakennusten erillislämmityssektorin kohdalla pyritty välttämään liisäämällä osaan laskuista korjauskerroin sen mukaan, kuinka paljon toimenpidekohtaisten laskujen on arvioitu menevän päällekkäin muiden toimenpiteiden kanssa.

7.2.3 Iso-Britannia, CCC (2015)

Isossa-Britanniassa keskeinen päästövähennysten kustannustehokkuuteen liittyvä raportti on Sectoral Scenarios for the Fifth Carbon Budget -raportti, joka on liite CCC:n (Committee on Climate Change) laatimalle ”The Fifth Carbon Budget – The next step towards a low carbon economy” (CCC, 2015a) -selvitykselle. Selvityskokonaisuuden tarkoituksena on tuottaa tietoa viidennen hiilidioksidibudjetin laadinnalle.

Rakennusten erillislämmityksen osalta CCC:n (2015b) selvityksessä on arvioitu sektoriin liittyviä päästövähennystoimia erikseen asuinrakennuksille ja muille rakennuksille. Asuinrakennusten osalta on arvioitu esimerkiksi öljy- ja kaasulämmityksen korvaamista lämpöpumpuilla, kaukolämpöverkkojen hyödyntämistä, seinien eristämistä ja lämpimän käyttöveden energiatehokkuuden parantamista. Alla on listattu muutama esimerkki näistä laskelmista ja lähestymistavoista:

- Maalämpöpumppujen kustannustehokkuutta on laskettu muodostamalla skenaario niiden käyttöönotolle (uusien asuntojen kohdalla 50 % vuonna 2025), laskemalla maalämpöpumppujen kokonaismäärä (perustuen asumis-, yhteisö- ja paikallishallintoministeriön luomaan uudisasuntojen rakennusennusteeseen) ja kertomalla lukumäärä maalämpöpumppujen kustannuksilla. Sektorien välisiä ristikkäisvaikutuksia on otettu huomioon jossain määrin. Esimerkiksi lämpöpumppujen päästöjä on arvioitu käyttämällä sähkön arvioitua päästökerrointa tulevaisuudessa. Energia-sektorilla on otettu huomioon lämpöpumpuista aiheutuva energian kysynnän nousu arvioidun käyttöönottomäärän perusteella.
- Seinien eristyksen päästövähennyspotentiaali on laskettu arvioimalla kuinka monta asuntoa voidaan lisäeristää kustannustehokkaasti (CCC:n analyysin mukaan 2 miljoonaa kiinteäseinäistä taloa, sekä 9 miljoonaa onteloseinäätaloa ja 6 miljoonaa ullakkoa). Kiinteäseinäisten talojen osalta lukumäärä pohjautuu arvioon siitä, kuinka monessa talossa toimi on kustannustehokas ja kuinka monessa talossa se ei ole kustannustehokas, mutta silti järkevä toteuttaa. Muiden osalta arvio

pohjautuu oletukseen, että lähes kaikki potentiaali näille toimille tulee realisoituksi.

Kustannustehokkuus on arvioitu toimenpidekokonaisuudelle, eikä yksittäisiä analyysejä ole kuvattu tarkasti. Kustannuksille on tehty herkkyystarkasteluita perusskenaariossa arvioimalla poltto-aineiden kustannusten sekä pääoman kustannuksen vaikutusta päästövähennysten hintaan.

Ristikkäisvaikutuksia tai kerrannaisvaikutuksia ei ole otettu huomioon laskennallisesti pitkällä tähtäimellä, mutta niiden vaikutukset on huomioitu ja käsitelty epäsuorasti. Maalämpöpumppujen kohdalla CCC:n analyysin mukaan asuinrakennusten olemassa olevien erillislämmitysratkaisujen korvaaminen ei ole kustannustehokasta suhteessa tavoiteltavaan hiili-dioksidin päästövähennysten hintaan tai valikoitujen toimien edullisimmasta päästä. Huonon kustannustehokkuuden taustalla on kustannukset suhteessa vaihtoehtoihin lämmitysmuotoihin, ennen kaikkea suhteessa kaasulämmitykseen. CCC:n analyysin mukaan maalämpöpumput ovat kustannuskilpailukykyisiä öljylämmitykseen verrattuna vasta vuoden 2030 jälkeen ja maakaasuun verrattuna vasta vuoden 2050 jälkeen (CCC, 2015b). Suomessa tyypillisesti maalämpöpumppujen on arvioitu olevan kannattava vaihtoehto jo sellaisenaan suhteessa esim. öljylämmitykseen, kuten mm. tässä selvityksessä (katso osio 0). Yksi merkittävimmistä tekijöistä todennäköisesti on erilaiset polttoaineiden hintaoletukset. Suomessa sähkö on edullisempaa kuin Britanniassa (Eurostat, 2019) ja toisaalta Britanniassa vaihtoehtoinen lämmitysmuoto on useimmiten kaasulämmitys, eikä öljylämmitys kuten Suomessa (Statista, 2019).

Lämpöpumppujen osalta oletetaan kuitenkin, että päästövähennysten kustannustehokkuus tulee paranemaan vuoden 2030 jälkeen nykyistä enemmän, jos niiden käyttöönottoa tuetaan jo tässä vaiheessa. (CCC, 2015b).

7.2.4 Yhteenveto analyysimenetelmistä

Yleisimpiä rakennusten erillislämmityssektorin mallinnusmenetelmiä ovat yksittäistarkastelu, staattinen malli sekä osittaistasapainomalli (katso Taulukko 7-7). Sektori mallinnetaan tyypillisesti itsenäisesti eikä esimerkiksi osana muita sektoreita tai osana kokonaiskansantaloutta.

Itse päätöksentekijät, eli teknologian käyttöönottajat tai toimenpiteen kohteet tarkastelevat tilannetta tyypillisesti ”yksittäistarkasteluna” ja huomioivat vain itselleen koituvat kustannukset. Tämän vuoksi yksittäistarkastelu on hyödyllinen menetelmä toimenpiteiden ja ohjaukeinojen suunnitteluun rakennussektorilla. Toisaalta taas tämä mene-

telmä ei ota huomioon kansantaloudellisia vaikutuksia tai toimenpiteiden päällekkäisyyksiä, joihin eri skenaariot ja kansantaloudelliset tasapainomallit ottavat paremmin kantaa. Laskennasta tulee kuitenkin helposti monimutkaista ja oletuksia joudutaan tekemään myös tasapainomallien kohdalla. Yksittäisten toimenpiteiden arviointi ottaa heikosti nämä näkökohdat mukaan, mutta laskentaan saadaan syvyyttä lisäämällä erilaisia skenaarioita ja kokeilemalla eri lähtötietoja. Myös tämän projektin puitteissa järjestetyn työpajan osallistajat näkivät, että skenaariotarkastelu soveltuu rakennusten erillislämmityssektorin toimien tarkasteluun.

Perusura

Niin kuin muillakin sektoreilla, myös rakennusten erillislämmityksessä perusuran kehittäminen on yksi keskeisimmistä laskentaan vaikuttavista tekijöistä. Näin ollen epävarmuudet perusuran laskennassa luovat pohjan kaikelle muulle laskennalle. Tähän vaikuttavat näkemykset rakennussektorin kehityksestä, mukaan lukien purkuaste, omaehtoinen lämmitysmuotojen muutos (eli oletettu nykyinen kehitys, ilman lisätoimenpiteiden tai muun lisäohjauksen vaikutusta), ominaislämmönkulutuksen kehitys ja asuntojen koon kehitys, vain muutamia asioita mainiten. Yksistään perusuran muodostaminen on siis vaativa tehtävä laskennan näkökulmasta, sillä historiallista kehitystä ei voi välttämättä käyttää ennakoimaan tulevaisuuden kehitystä.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voi sanoa, että perusura on tyypillisesti joko maan viimeisimmän ilmastostrategian mukainen näkemys rakennussektorin kehityksestä tai vaihtoehtoisesti business-as-usual -tyyppinen mallinnus, joka nojaa vahvemmin historiatietoihin. Olisi järkevää, että kaiken laskennan perustana käytettäisiin virallisia perusuria eri sektorien kehitykselle. Virallisuudella viitataan tässä siihen, että perusurat muodostettaisiin ministeriöiden tai muiden valtiollisten laitosten toimesta ja näitä perusuria käytettäisiin erilaisessa valtionhallinnon laskennassa kuten ilmastostrategioiden laskennan pohjana. Tämä lisäisi myös laskennan läpinäkyvyyttä ja vertailukelpoisuutta, kun käytössä olisi aina samat perusurat.

Suomen kohdalla Energia- ja Ilmastostrategian yhteydessä sekä KAISUn menetelmäkehikossa on listattu erinäisiä oletuksia rakennussektorin perusuraan liittyen, kuten korjausrakentamisesta tai energiatehokkuustoimista saadut vuosisäästöt tai pörsisähkön tai energiaverotuksen hintakehitys. Tästä huolimatta yksiselitteistä kuvaa on vaikea piirtää. Myös osa luvuista, kuten rakennusten määrä, eri lämmitysmuotojen hinta ja hintaennuste sekä verotiedot, tulisi päivittää aktiivisesti, jotta laskelmat olisivat mahdollisimman päivitettyjä. Tulevaisuudessa voisi olla järkevää tarjota absoluuttisten lukujen lisäksi lähde, josta päivitetyn luvun voisi käydä tarkistamassa. Koska rakennussektorilla on paljon risteäviä vaikutuksia energiasektoriin, muun muassa hintojen kehityksen suhteen, rakennussektori vaatisi lisäksi myös perusuran energian hintojen

kehityksestä ja muista olennaisista muuttujista, kuten energian ja polttoaineiden verotuksesta.

Muuttujat ja data

Rakennussektorilla yksi tärkeimmistä muuttujista on rakennus tai asunto, joista jompikumpi on usein keskeinen laskentayksikkö. Myös eri teknologioihin liittyvät yksiköt, kuten lämpöpumput tai kaukolämpöverkon laajuus, ovat tyypillisiä laskennan muuttujia. Laskennasta tekee haastavan se, että esim. eri asunto- ja rakennustyypeille pitää tehdä erilaisia oletuksia ja laskelmia koskien esim. rakennusten keskimääräistä ominaislämmönkulutusta, yksittäisten asuntojen kokoa sekä niiden käyttämää lämmitysmuotoa ja niihin liittyviä hintoja ja investointeja. Näitä määreitä mitataan tyypillisesti joko MWh-lämpönä tai EUR/MWh-lämpönä.

Historia- ja nykytietoja löytyy rakennusten erillislämmityssektorin kohdalla tyypillisesti melko paljon, mutta tiedoissa saattaa olla puutteita. Rakennusten erillislämmitykseen liittyen tilastoissa voi esimerkiksi näkyä rakennusten lukumäärä ja rakennuksen alkuperäinen tarkoitus, mutta ei sitä, mihin rakennusta nykyään käytetään. Myös rakennuksen ”arvoa” ja sitä kautta esimerkiksi uuden lämmitysmuotoinvestoinnin mielekkyyttä voi olla vaikea määrittää, mikäli tilastoja katsoo hyvin kapeasta näkökulmasta. Paikkatiedotadalla voidaan tukea muita tilastoja, mutta tilastojen yhdistäminen saattaa olla hankalaa ja se saattaa lisätä epävarmuustekijöitä.

Tulevaisuuden ennustaminen on niin ikään haastavaa, sillä erilaiset positiiviset ja negatiiviset ajurit vaikuttavat tulevaisuudenkuvaan. Positiivisia ajureita ovat esim. asutukseen sekä rakennuskannan kasvaminen, kun taas negatiivisia ajureita ovat mm. energiatehokkuus ja ilmastomuutos. Nämä ajurit myös vaihtelevat merkittävästi alueellisesti esimerkiksi Suomen kokoisessa maassa sekä alueiden sisällä, kaupunkien, kaupunkikeskustojen, taajamien ja maaseudun välillä.

Skenaariot ja ajanjakso

Tyypillisesti perusuraa verrataan erilaisiin skenaarioihin/vaihtoehtoisiiin kehityspolkuihin, jotka perustuvat esimerkiksi ilmastotoimiin tai niiden tekemättä jättämiseen. Skenaarioiden avulla voidaan tuottaa dataa, joka auttaa päätöksentekijöitä näkemään esimerkiksi erilaisten poliittisten toimien kustannustehokkuus. Rakennussektorin malleissa voidaan myös laskea kriittistä polkua, joka pitäisi olla saavutettuna tiettyihin vuosiin mennessä, jotta ilmastostrategian tavoitteet olisivat ylipäänsä saavutettavissa. Rakennussektorin malleissa nämä kriittiset polut liittyvät esimerkiksi siihen, kuinka paljon pitää olla rakennettuna kaukolämpöverkkoa tai kuinka monta ilmalämpöpumpua pitää olla asennettuna tiettyyn vuoteen mennessä. Johtopäätöksenä voi sanoa,

että rakennussektorin laskennassa on käytetty useasti normatiivisia skenaarioita sekä osittain predikatiivisia ja eksploratiivisia skenaarioita.

Skenaarioita kehitettäessä pitää samalla määrittää aikaväli, jolla laskentaa tarkastellaan. Tyypillisesti lähtökohtana on pitkän aikavälin laskenta, joka ulottuu vähintään 10 vuotta tulevaisuuteen. Eri teknologioiden kohdalla pitää myös olettaa muun muassa keskimääräinen käyttöikä eri lämmitysteknologioille, mahdolliset vuotuiset käyttötunnit ja kattiloiden hyötykäyttösuhteet. Tämä asettaa laskentaan ja lopputuloksen luotettavuuteen jo lähtökohtaisesti paljon epävarmuuksia.

Laskennan ajanjakso vaikuttaa hyvin paljon lopputulokseen. Valittavia vaihtoehtoja ovat esimerkiksi kumulatiivinen ilmastostrategian ajanjakso, kumulatiivinen toimenpiteen toteuttamisen elinkaari sekä staattinen tilanne esimerkiksi ilmastostrategian ajanjakson loppupisteessä. Tähän projektiin liittyvässä työpajassa keskusteltiin myös tästä aiheesta ja johtopäätöksenä oli, että vaikka elinkaaren määrittelyyn ja laskentaan liittyy epävarmuuksia, se on silti paras tapa lähestyä aihetta. Muuten kustannustehokkuuslaskenta vääristyy, mikäli esimerkiksi maalämpöpumpuinvestointeja ei voi jyvittää tarpeeksi usealle vuodelle ja koko lämpöpumpun elinkaaren ajalle.

KAISUssa puhutaan lähinnä maalämmöstä öljylämmityksen vaihtoehtoisena lämmitysmuotona. Kustannustehokkuuslaskennassa olisi kuitenkin hyvä ottaa huomioon myös muita vaihtoehtoisia lämmitysmuotoja kuin maalämpöpumput. Kustannustehokkaimman teknologian määrittely saattaa vaihdella Suomessa aluekohtaisesti ja toisaalta myös tarkasteltavan rakennuskohteen mukaan. Tähän vaikuttaa myös esimerkiksi lämmityksen tarve: käytetäänkö lämpöä käyttöveden vai tilojen lämmittämiseen. Tyypillisesti ajatellaan, että ilmastonmuutos ja energiatehokkuustoimet vaikuttavat vain tilojen lämmittämiseen, ei käyttöveden lämmitykseen. Tilojen lämmityksen ja käyttöveden lämmityksen suhde rakennuskannassa vaihtelee rakennussegmentitään, mikä lisää jälleen lisää epävarmuuksia laskentaan. Kuntien osalta erikoistapauksia ovat esimerkiksi uimahallit, jäähallit ja erilaiset monitoimitilat.

Kustannukset ja päästöt

Rakennussektorin laskennassa kustannusten kohdalla keskitytään pääsääntöisesti teknologiakustannuksiin. Näihin liittyvät sekä muuttuvat että kiinteät kustannukset. Muuttuvia kustannuksia ovat esimerkiksi energian hinta, valmisteveron tai muun veron (esim. sähköveron) määrä ja energian siirtohintaa. Muuttuvat kustannukset voidaan esittää esimerkiksi yksikössä EUR/MWh-lämpö. Kiinteistä kustannuksista otetaan tyypillisesti huomioon investointikustannukset. Huolto- ja muita kiinteitä kustannuksia ei yleensä oteta mukaan laskuihin. Kiinteät kustannukset mallinnetaan tyypillisesti euroina (tai muussa valuutassa) viitevuoden hinnoin. Kuten monella muullakin sektorilla,

myös rakennussektorilla diskontataan useimmiten vain kokonaiskustannukset eikä esim. päästöjä. Diskonttaus korkona on tyypillisesti sosiaalinen diskonttaus korko (3,5–4 %).

Rakennussektorin päästöjä mitataan tyypillisesti kasvihuonekaasupäästöjen vähentymisellä, yksikkönä t CO₂e tai pelkkä t CO₂ (ei e.). Tässä käytetyllä päästövähennyskertoimella on merkittävä rooli siinä, mitä lukuja laskennasta saadaan ulos. Esimerkiksi lämpöpumppujen päästökerroin riippuu sähkön päästökertoimen kehityksestä. Sähkön päästökertoimessakin voidaan käyttää keskimääräistä tai marginaalista kerrointa, joista tyypillisempi on keskimääräinen päästökerroin.

Ristikkäisvaikutukset ja tulosten esitys

Kirjallisuuskatsauksen perusteella rakennusten erillislämmityssektoria mallinnettaessa lasketaan verrattain vähän ristikkäisvaikutuksia muihin sektoreihin. Niissä tutkimuksissa, joissa ristikkäisvaikutukset on mallinnettu tai niiden mallinnusta on avattu, voidaan nähdä, että sektorikytkennät ovat huomioitu ensimmäisen kertaluvun mukaan tai käyttämällä toimikohtaista korjauskerrointa. Herkkyystarkastelua tehdään sen sijaan paljon rakennusten erillislämmityssektorilla. Tarkastelluissa selvityksissä herkkyystarkastelu liittyy pääsääntöisesti diskonttauskoron vaikutukseen tai energian, polttoainesten tai teknologioiden hintojen vaikutukseen lopputulokseen. Esimerkiksi Iso-Britanniassa on tarkasteltu biomassan riittävyttä ja asetettu sen saatavuudelle rajat malliin. Osassa selvityksistä on myös tarkasteltu tilannetta, jossa tietty määrä skenaariota jarruttavia esteitä toteutuu, mikä vaikuttaa negatiivisesti lopputulokseen.

Tavallisesti lopputulokset esitetään esimerkiksi MAC-käyrillä, joissa näytetään EUR/tCO₂e-kustannukset teknologioittain tai toimittain. Toinen yleinen vaihtoehto on vertailla eri poliittisten toimien tai skenaarioiden kustannussäästöä taulukkomuodossa. Toimenpiteiden kohdalla voi erotella erikseen näkyviin toimenpiteen toteuttamisesta aiheutuvat hallinnolliset kustannukset, varsinaiset teknologiakustannukset sekä päästöjen määrä. Lopputuloksissa voidaan ottaa myös kantaa asennettavien lämmitysjärjestelmien (kuten lämpöpumppujen) määrään lukumääräisesti tai energian yksikkönä.

Esimerkkejä

Seuraava taulukko listaa kirjallisuuskatsauksessa olleiden maiden lähestymistapoja rakennusten erillislämmityksen päästövähennysten kustannustehokkuuden arviointiin.

Taulukko 7-7 Yhteenveto rakennusten erillislämmityssektorin tarkasteluista, tärkeimmät raportit

Saksa Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (PwC 2016)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Tutkimuksessa selvitetään kaikkien kvantifioitavissa olevien päästövähennystoimenpiteiden päästövähennyspotentiaali sekä kustannustehokkuus. Perusura riippuu laskettavasta toimenpiteestä.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Toimenpiteen kohdalla, jossa käsitellään energiatehokasta saneerausta, on oletettu nykytilanne, johon skenaariota verrataan. Perusurassa on oletettu nykytilan pohjalta Saksan saneerattavien asuntojen lukumäärä, niiden keskimääräinen lämmön kulutus ja saneerauksesta saatava hyöty (säästettynä lämpönä).
Mallinnusmenetelmät (ja ristikkäisvaikutukset)	<ul style="list-style-type: none"> Poliittisen toimenpiteen oletetaan aiheuttavan vaikutus markkinoille, joka tässä tapauksessa nostaa saneerausastetta. Skenaariota on verrattu perusuraan ja laskettu saneerattavien rakennusten lukumäärä ja niistä säästetyt päästöt pienentyneen energiankulutuksen johdosta.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Yksittäismallinnus kaikkien toimenpiteiden kohdalla.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Tuupalaskentaa rakennusten erillislämmityssektorin kohdalla on pyritty välttämään lisäämällä osaan laskuista korjauskerroin sen mukaan, kuinka paljon toimenpidekohtaisten laskujen on arvioitu menevän päällekkäin muiden toimenpiteiden kanssa. Energiatehokkaan saneerauksen toimenpiteen kohdalla on oletettu korjauskerroin 0,8.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Jokaisen toimenpiteen kohdalla määritetään ohjelmakustannukset (hallinnolliset kustannukset), bruttokustannukset ja säästetyt energiakustannukset (mikäli näitä on).

Iso-Britannia Research on district heating and local approaches to heat decarbonization (Element Energy Limited 2015)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Perusuraa tai siihen liittyviä oletuksia ei erotella selvityksessä, vaan se perustuu oletettavasti nykytilan jatkumiseen samalla tahdilla kuin aikaisemminkin historiallisen kehityksen valossa.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Selvityksessä mallinnetaan kolme eri skenaariota, joilla tähdätään kaukolämmön ja paikallisten lämmitysratkaisujen lisäämiseen vuoteen 2050 mennessä. Central-skenaarion lopputulema: kaukolämpöä käytetään 42 TWh p.a. vuonna 2030 ja 81 TWh p.a. vuonna 2050. Barriers-skenaarion lopputulema: tässä skenaariossa oletetaan monien riskien ja esteiden toteutuvan, joten kaukolämpöä käytetään vähemmän eli 25 TWh p.a. vuonna 2030 ja 39 TWh p.a. vuonna 2050. High-skenaarion lopputulema: tässä skenaariossa oletetaan useampia poliittisia toimenpiteitä, jotka edesauttavat kaukolämmön asemaa. Skenaario johtaa lopputulokseen, jossa kaukolämpöä käytetään 54 TWh vuonna 2030 ja 111 TWh vuonna 2050. Selvityksessä on laskettu myös historiatietoon perustuva kriittinen skenaario, joka ei ole erillinen mallinnusskenaario vaan kertoo kuinka paljon kaukolämpöä pitäisi olla otettu käyttöön vuosittain, jotta vuosien 2030 ja 2050 tavoitteiden saavuttaminen olisi mahdollista. Käyttöönoton suurin rajoitus on lähinnä infrastruktuurin rakentaminen.
Mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> Staattinen uptake-malli, jossa otetaan tarkasti huomioon alueellinen rakennuspotentiaali ja paikallisen rakentamisen vaikutus naapurialueisiin.

Iso-Britannia Research on district heating and local approaches to heat decarbonization (Element Energy Limited 2015)	
(ja ristikkäis-vaikutukset)	<ul style="list-style-type: none"> Mallissa arvioidaan biomassan saatavuutta eri skenaarioissa, mutta ei oteta kantaa sen vaikutuksiin muihin toimialoihin. Vaikutuksia muihin sektoreihin ei ole huomioitu.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Kustannuksista lasketaan teknologiakustannukset (£/MWh), jotka on jaoteltu pääoma- ja operointikustannuksiin. Central ja High-skenaarioiden laskennassa on käytetty 3,5 % ja Barriers-skenaarion laskennassa 7,5 % diskonttauskorkoa.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Esitetään jokaiselle skenaariolle kaukolämmön tuotantomäärät TWh p.a. vuonna 2030 ja vuonna 2050 sekä hiilidioksidipäästöjen tippuminen vuonna 2050 yksikössä MtCO₂ p.a. Herkkyytarkastelu polttoaineiden hinnoille.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Muita hyötyjä ei tarkastella.

Iso-Britannia Sectoral scenarios for the Fifth Carbon Budget – Technical report (CCC 2015b)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Tämänhetkinen näkemys rakennusalan ja energiamarkkinoiden kehityksestä perustuen virallisiin tahoihin.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Rakennussektorin osalta mallissa on hahmoteltu eri skenaarioita, jotka perustuvat eri lämmitysteknologioihin. Jokaisen lämmitysteknologian kohdalla on tehty oletuksia (esim. liittyen polttoaineiden hintoihin ja regulaation kehitykseen). Mallinnus on luonteeltaan staattinen.
Mallinnusmenetelmät (ja ristikkäisvaikutukset)	<ul style="list-style-type: none"> Staattinen malli (bottom-up), ei täysin yksittäistarkastelua. Malli huomioi myös ei-taloudelliset tekijät päätöksenteossa. Hinnat, teknologian kehitys ja sektorikytkennät ovat eksogeenisiä muuttujia. Epäsuoria tai dynaamisia vaikutuksia ei ole mallinnettu.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Kustannusten kohdentuminen yksilöille huomioitu itse mallinnuksessa, mutta ei tulostasolla. Käytetty sosiaalista diskonttauskorkoa (3,5 %).
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Kustannusten kohdentuminen yksilöille huomioitu itse mallinnuksessa, mutta ei tulostasolla. Käytetty sosiaalista diskonttauskorkoa (3,5 %).
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Kustannusten kohdentuminen yksilöille huomioitu itse mallinnuksessa, mutta ei tulostasolla. Käytetty sosiaalista diskonttauskorkoa (3,5 %).

Iso-Britannia Pathways to high penetration of heat pumps (Frontier Economics 2013)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Perusurana toimii raportin tekohetkellä vallinnut tilanne lämpöpumppujen asennusaktiivisuudesta Iso-Britanniassa, mikä tarkoittaa noin 20 000 lämpöpumpun asentamista vuosittain. Selvityksen fokus on ilmalämpöpumpuissa, vaikkakin maalämpöpumput mainitaan myös. Perusura perustuu selvityksessä esitettyyn markkinaselvitykseen ja kirjallisuuskatsaukseen. Perusuraan vaikuttaa vahvasti myös mm. fossiilisen energian hinta, joka perustuu DECC:n tekemään ennusteeseen.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Perusuraa on verrattu CCC:n esittämään neljänteen hiilibudjettiin ja siinä kuvattuun Central-skenaarion mukaisiin toimenpiteisiin.

Iso-Britannia Pathways to high penetration of heat pumps (Frontier Economics 2013)	
	<ul style="list-style-type: none"> • Hiilibudjetin tavoitteet on jaettu kahteen osaan vuoden 2030 ja vuoden 2050 tavoitteen mukaan. Kummankin vuoden tavoitteen saavuttamiseksi on muodostettu oma skenaario. Vertaamalla perusuraa skenaarioihin on muodostettu johtopäätöksiä siitä, mitä poliittisia toimenpiteitä pitää tehdä, jotta skenaariot voidaan saavuttaa. • Kustannustehokas skenaario: 160 TWh lämpöpumppujen asentaminen Isossa-Britanniassa vuoteen 2030 mennessä, joista noin puolet asennetaan kotitalouksissa. Skenaarion vaatimat asennukset tarkoittavat yhteensä noin 6.8 miljoonaa lämpöpumppua. • Kriittinen skenaario: 365 TWh lämpöpumppujen asentaminen Isossa-Britanniassa vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaisi noin 31 miljoonan lämpöpumpun asentamista kotitalouksissa yli 80 %:ssa kiinteistöjä.
Mallinnusmenetelmät (ja ristikkäisvaikutukset)	<ul style="list-style-type: none"> • Staattinen uptake-malli, joka mallintaa eri kuluttajaryhmien käyttäytymistä eri rakennuskategorioissa. • Mallissa otetaan huomioon ensisijaisesti teknologiakustannukset. Malli kvantifioi myös skenaarioihin liittyviä esteitä ottamalla huomioon esimerkiksi seuraavat esteet (sulussa näkyminen mallissa): lisäkustannukset (pääomakustannuksen tai operoinnin kustannuksen kasvaminen), kulutuskäyttäytyminen (osto-halukkuuskäyrän muutokset) ja kysynnän ja tarjonnan rajoitteet (kasvukäyrän rajoitukset). • Ristikkäisvaikutuksia ei oteta erikseen huomioon.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> • Kustannukset ja nettonykyarvo on diskontattu sosiaalisella diskonttauskorolla (3,5 %) vastaamaan vuoden 2010 tilannetta • Kustannukset kohdentuvat sekä valtiolle että kotitalouksille ja ne on eroteltu jokaisen poliittisen lisätoimenpiteen kohdalle erikseen. Valtion kustannukset koostuvat poliittisten toimenpiteiden järjestämisestä ja erilaisten kannustimien tarjoamisesta ja kotitalouksien kustannukset ilmalämpöpumppujen asentamisesta.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> • Tulokset on esitetty taulukossa, joka näyttää kuinka paljon kunkin poliittisen lisätoimenpiteen kohdalla saavutetaan lämpöpumppuasennuksia (kumulatiiviset asennukset ja asennukset TWh-mitattuna), hyötyjä ja kustannuksia (nettonykyarvo sisältäen hallinnon ja kuluttajien kustannukset sekä hiilidioksidisäästöt) sekä mikä on toimenpiteen kustannustehokkuus (säästetyn CO2-tonnin kustannus punnissa). Samassa taulukossa esitetään myös perusuran tiedot lämpöpumppuasennusten osalta. • Selvityksessä esitetään myös poliittisten lisätoimenpiteiden aikataulu.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> • Muita hyötyjä ei tarkastella.

Iso-Britannia Sectoral scenarios for the Fifth Carbon Budget – Technical report (CCC 2015b) Review of potential for carbon savings from residential energy efficiency (Element Energy Limited 2013)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> • Selvitys päivittää vuonna 2011 CCC:lle tehtyä energiatehokkuus selvitystä tarkemmilla ja realistisemmilla tiedoilla. Perusurana toimii oletettavasti edelliseen CCC:lle raporttiin valmisteltu näkymä tulevaisuuden kehityksestä.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> • Perusuraa verrataan skenaarioon, jossa toteutetaan energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä. • Toimenpiteiden kustannustehokkuutta vertaillaan lisäksi kolmella eri tasolla 1) päällekkäisvaikutukset on poistettu, 2) tilanne, jossa lämmitettävien sisälämpötilojen huonelämpötilat nousevat paremman eristyksen

Iso-Britannia Sectoral scenarios for the Fifth Carbon Budget – Technical report (CCC 2015b) Review of potential for carbon savings from residential energy efficiency (Element Energy Limited 2013)	
	<p>seurauksesta, mikä syö energiatehokkuustoimenpiteiden hyödyn, 3) tarkastelu tehdään viime vuosina saatujen toteutuneiden energiatehokkuuslukujen perusteella, jotka ovat tyypillisesti laskennallisia arvoja matalampia. Vertailukohtaksi on lisätty myös teknologisesti saavutettavissa oleva potentiaali.</p>
Mallinnusmenetelmät (ja ristikkäisvaikutukset)	<ul style="list-style-type: none"> • Mallinnus perustuu pitkälti yksittäistarkasteluun. • Eri toimenpiteiden päällekkäiset päästövähennysvaikutukset on otettu huomioon laskelmassa. Selvityksestä ei käy ilmi, millä tavalla päällekkäisyydet on mallinnettu ja poistettu.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> • Kustannuksista on otettu huomioon kiinteät ja vaihtuvat teknologiakustannukset. • Selvityksessä on käytetty 3,5 % diskonttaus korkoa.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> • Tulokset esitetään MAC-käyrällä, jossa on esitetty eri päästövähennystoimenpiteiden kustannus (£/t) ja päästövähennykset (kt CO₂). • Kustannustehokkuutta vertaillaan myös eri tarkastelutasojen osalta, esimerkiksi miten päällekkäisyyksien huomioiminen vaikuttaa kokonaiskustannustehokkuuteen.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> • Muita hyötyjä ei ole otettu huomioon.

Suomi Cost-efficient emission reduction pathway to 2030 for Finland (Granskog ym. 2018)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> • Raporttia varten on muodostettu ns. business-as-usual skenaario, jolla nykytrendin oletetaan jatkuvan.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> • Skenaario kuvaa tilannetta, jossa Suomi voi kustannustehokkaasti vähentää päästöjä 60 % vuoteen 2030 mennessä. Raportti myös ehdottaa erilaisia poliittisia toimenpiteitä, joilla tavoitteeseen voidaan päästä. • Rakennusten erillislämmitystä mallintavassa skenaariossa tärkeimpänä yksittäisenä kokonaisuutena on öljylämmityksestä luopuminen ja sen korvaaminen esimerkiksi maalämpöpumpuilla.
Mallinnusmenetelmät (ja ristikkäisvaikutukset)	<ul style="list-style-type: none"> • Sektorikohtainen osittaistasapainomalli, eri sektorit on mallinnettu erikseen. • Sektorikytkennät ensimmäisen kertaluvun mukaan. • Skenaarioiden toteutumisen vaikutuksia on selitetty kvalitatiivisesti, esimerkiksi rakennusten erillislämmityksen uusien ratkaisujen vaikutus sähköverkon kuormitukseen ja energian tuotantoon.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> • Laskettu teknologia- ja sektorikustannuksia. • Käytetty sosiaalista diskonttauskorkoa (4 %). • Kustannukset kohdistuvat pääsääntöisesti kotitalouksille ja teollisuudelle. Valtiolle kohdistuu hallinnollisia kustannuksia (poliittisten toimenpiteiden läpivienti).
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> • MAC-käyrä, jossa esitetty EUR/tCO₂e-kustannukset teknologioittain.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> • Muita hyötyjä ei tarkastella.

7.2.5 Esimerkkilaskenta rakennussektorilta

Pöyryn tekemä rakennusten erillislämmityksen esimerkkilaskenta liittyy KAISUn lisätoimenpiteeseen ”valtionhallinto luopuu toimitilojensa öljylämmityksestä vuoteen 2025 mennessä ja kaikkia julkisia toimijoita kannustetaan samaan”. Laskennan perustana on suoraviivainen laskenta, jossa verrataan perusuraa erilaisiin öljylämmityksestä luopumisen skenaarioihin. Laskenta on hyvin esimerkinomainen ja sen tarkoituksena on tuoda esiin rakennusten erillislämmityssektorin laskentaan liittyviä erityishuomioita, epävarmuuksia ja olettamuksia. Tavoitteena on myös nostaa esiin huomioita tulosten esittämistavasta.

Perusuran muodostamisen keskeiset oletukset ja niihin liittyvät epävarmuustekijät on vedetty yhteen seuraavassa taulukossa.

Taulukko 7-8 Perusuran muodostaminen rakennussektorin esimerkki-laskennassa

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018, ellei toisin mainittu	Epävarmuustekijät ja kommentit
Öljylämmityksen määrä valtionhallinnossa	<ul style="list-style-type: none"> • Öljylämmitystä 6 127 053 m² • Ominaislämmönkulutus • 150 kWh/m² 	<p>Öljylämmityksen määräksi on otettu lähtöpiste perustuen Tilastokeskuksen tilastoihin valtio- ja kuntaomisteisista rakennuksista vuonna 2017. Uudempaa tietoa ei ollut saatavilla, joten vuoden 2018 arvona on käytetty vuoden 2017 lukua.</p> <p>Tarkkaa jaottelua valtion omistamiin ja kunnan omistamiin rakennuksiin ei ole saatavilla. Tilastoissa ei myöskään esitetty valtionhallinnon rakennusten tarkkaa elinkaarta tai ominaislämmönkulutustietoja. Tämän vuoksi laskennassa käytetty ominaislämmönkulutus on arvio mahdollisesta kulutuksesta eikä tarkka tilastotieto.</p> <p>Toimenpiteen kohdalla kenties tärkeämpi vaikutus on sen ohjausvaikutus kunta- ja muulle julkiselle sektorille. KAISUssa ei oteta kantaa siihen, kuinka suuri ohjausvaikutuksen oletetaan olevan. Tässä alustavassa esimerkkilaskennassa valtion ja kuntien lämmitysmäärät on laskettu yhteen, eli erillisiä lämmitysmäärän kehityksiä valtion ja kuntien välillä ei</p>

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018, ellei toisin mainittu	Epävarmuustekijät ja kommentit
		<p>ole otettu huomioon. Laskenta kattaa siis käytännössä koko julkisen sektorin. Lisäksi tässä laskennassa on oletettu, että kaikki valtion ja kuntien lämmitys laskee 0 prosenttiin, eli ohjausvaikutus olisi täydellinen.</p> <p>Työpajan keskustelujen perusteella laskennallisesti ei ole niin merkittävää väheneekö öljylämmitys noltaan, vaikka näin ei käytännössä oikeasti tapahtuisikaan. Todennäköisesti tämä ei ole reaaliaimassa edes järkevää, sillä huipputehokattiloiden ja muiden varaenergianlähteiden on käytettävä polttoöljyä toiminnoissaan.</p>
Öljylämmityksen määrän väheneminen omaehtoisesti valtionhallinnossa	<ul style="list-style-type: none"> • Öljylämmityksen väheneminen -5,0 %/a • Purkuaste -0,3 %/a 	<p>Öljylämmityksen omaehtoinen väheneminen perusurassa on tällä hetkellä hyvin epävarma oletus, sillä datan puutteesta johtuen elinkaarilaskentaa ei ole toistaiseksi käytetty laskennan tukena. Seuraavassa tarkistetussa esimerkkilaskelmassa tätä prosenttia voidaan täsmentää perustuen esimerkiksi yleisen rakennuskannan historialliseen muutokseen, jos tämä nähdään järkevänä referenssipisteenä.</p> <p>Purkuaste perustuu Energia- ja ilmastostrategian taustaraportin oletuksiin yleisen rakennuskannan kehityksestä.</p>
Öljylämmityksen kustannus	<ul style="list-style-type: none"> • Kevyen polttoöljyn valmistevero 24,05 snt/l • Kevyen polttoöljyn hinta 53,12 EUR/MWh • Raakaöljyn hinta 75 USD/bbl v 2018 • Raakaöljyn hinta 116,4 USD/bbl v. 2030 (vuoden 2018 hinnoin) 	<p>Kevyen polttoöljyn hinnan oletetaan seuraavan raakaöljyn hinnan kehitystä. Kevyen polttoöljyn valmistevero ja raakaöljyn hinnan kehitys perustuvat Energia- ja ilmastostrategian taustaraportin oletuksiin yleisen rakennuskannan kehityksestä. Raakaöljyn hintoja on korjattu kuluttajahintaindeksillä vastaamaan vuoden 2018 hintatasoa. Hintojen oletetaan kehittyvän lineaarisesti vuosien 2018 ja 2030 välillä. Valmisteveron oletetaan pysyvän samalla tasolla tarkastelun ajan.</p> <p>Kevyen polttoöljyn hinta perustuu toistaiseksi Pöyryn arvioon vuoden 2018 hintatasosta.</p>

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018, ellei toisin mainittu	Epävarmuustekijät ja kommentit
		<p>Kevyen polttoöljyn hintakehitys on yksi suurimmista epävarmuustekijöistä laskennassa.</p> <p>Öljylämmityksen revisiokustannusta ei ole otettu huomioon laskennassa, koska oletuksena on, että uusia öljylämmitteisiä rakennuksia ei tule tarkastelujakson aikana eikä uusia investointeja öljylämmitykseen siis tarvita.</p>
Öljylämmityksen päästöt	<ul style="list-style-type: none"> • Kevyen polttoöljyn päästökerroin 261,7 gCO₂/kWh • Hyötysuhde 93 % 	<p>Kevyen polttoöljyn päästökerroin perustuu Ilmastolaskurin tietoihin.</p> <p>Öljykattilan hyötysuhde on toistaiseksi Pöyryn arvio, jota voidaan tarkentaa.</p> <p>Öljylämmityksen päästön oletetaan pysyvän vakiona tarkastelujakson aikana.</p>

Yllä olevin oletuksin on siis muodostettu perusura öljylämmityksen omaehtoisesta kehityksestä valtionhallinnon ja kuntien rakennuksissa vuosien 2018 ja 2030 välisenä aikana. Perusuraa pelataan kolmeen erilaiseen skenaarioon, jotka ovat:

1. Öljylämmitys vähenee lineaarisesti 0 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä
2. Öljylämmitys vähenee nopeasti 0 prosenttiin vuoteen 2022 mennessä
3. Öljylämmityksen kehitys seuraa perusuraa ja vähenee 0 prosenttiin vasta tarkastelujakson loppupuolella (2027-2030)

Laskennassa on haluttu ottaa mukaan erilaisia skenaarioita, jotta voitaisiin nähdä tulosten muuttuminen erilaisissa tilanteissa ja vielä tarkemmin pohtia kumulatiivisten ja yksittäisten vuosien päästövähennyslaskelmien eroja. Seuraavaan taulukkoon on lisätty skenaarioissa käytetyt lähtöoletukset ja pohdittu niihin liittyviä epävarmuustekijöitä.

Taulukko 7-9 Skenaarioiden muodostaminen rakennussektorin esimerkki-laskennassa

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018	Epävarmuustekijät ja kommentit
Öljylämmityksen korvaava lämmitysmuoto: maalämpöpumput	Ominaislämmönkulutus 150 kWh/m ²	<p>Laskennassa on oletettu, että kaikki öljylämmitys vaihdetaan maalämpöpumppeihin.</p> <p>Maalämpöpumppujen ominaislämmönkulutus rakennuksissa on oletettu olevan sama kuin öljylämmitteisissä rakennuksissa. Laskentaa voisi</p>

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018	Epävarmuustekijät ja kommentit
		<p>tarkentaa siten, että ominaislämmönkulutukselle laskettaisiin tai oletettaisiin kulutuksen vuosittainen väheneminen johtuen energiatehokkuustoimista. Toistaiseksi laskennassa ominaislämmönkulutuksen on oletettu pysyvän samalla tasolla koko tarkastelujakson ajan lähtötiedon puutteesta johtuen.</p> <p>Työpajan osallistujat kannattivat ”teknologiamixin” huomioimista laskennassa, mitä ei ole toistaiseksi otettu huomioon esimerkkilaskennassa. Tämä linkittyi vahvasti myös keskusteluun keskimääräisestä asunnosta/rakennuksesta ja sen vaikutuksesta laskentaan. Työpajan osallistujat nostivat esiin, että laskentaa olisi hyvä tehdä rakennustyypeittäin sen sijaan, että otettaisiin kaikista rakennuksista keskimääräinen koko ja kulutus laskentaan. Kullekin rakennustyyppille ja -koolle voisi myös sitoa ensisijaisen vaihtoehdoisen teknologian.</p>
Maalämpöpumppujen muuttuva kustannus	<ul style="list-style-type: none"> • Pörssisähkön hinta 46,8 EUR/MWh, v 2018 • Sähkön hinta 43,8 EUR/MWh, v. 220 (v 2018 hinnoin) • Sähkön hinta 64,4 EUR/MWh, v 2030 (v 2018 hinnoin) • Sähkön valmistevero 2,253 snt/kWh • Sähkön siirto 6,15 snt/kWh • Sähkön siirtohinnan kasvuprosentti 1,5 % v 2028 asti, sen jälkeen 0 % 	<p>Maalämpöpumppujen muuttuvaksi kustannukseksi on arvioitu käytännössä sähkön hinnan kehitys. Sähkön vuoden 2018 hinta perustuu Nordpoolin day-ahead - hintaan koko Suomen osalta. Sähkön valmistevero ja pörssisähkön hintakehitys perustuvat Energia- ja ilmastostrategian taustaraportin oletuksiin yleisen rakennuskannan kehityksestä. Näitä sähkön hintoja on korjattu kuluttajahintaindeksillä vastaamaan vuoden 2018 hintatasoa. Hintojen oletetaan kehittyvän lineaarisesti vuosien 2018 ja 2030 välillä, mutta putoavan välillä matalammaksi johtuen Olkiluoto 3:n valmistumisesta.</p> <p>Sähköveron oletetaan pysyvän samalla tasolla, mutta siirtohinnan oletetaan nousevan vuoteen 2028 asti korkeamman maakaapelointiastevaatumuksen vuoksi. Siirtohinnan oletetaan pysyvän tasaisena vuoden 2028 jälkeen lopun tarkastelujakson ajan.</p> <p>Sähkön hinnan kehitys on yksi suurimmista epävarmuustekijöistä laskennassa.</p>
Maalämpöpumppujen kiinteä kustannus	<ul style="list-style-type: none"> • Investointikustannus 2000 EUR/kW-lämpö • Huipun käyttötunnit 3000 h/v • Käyttöikä 20 v 	<p>Maalämpöpumppujen kiinteän kustannuksen komponentit ja oletukset perustuvat Pöyryn Huoltovarmuuskeskukselle tekemään julkiseen selvitykseen vuodelta 2019. Selvitys käsittelee energian huoltovarmuutta energiamurroksessa. (Pöyry Management Consulting 2019)</p> <p>Koska maalämpöpumpputeknologia on jo pitkälle kehittynyt teknologia, oletuksena on, että investointikustannus ei muutu merkittävästi tarkastelun aikana.</p>

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset, v. 2018	Epävarmuustekijät ja kommentit
		Maalämpöpumppujen kiinteään kustannukseen liittyy maalämpöpumpun koko, jota voitaisiin tarkentaa, kun rakennusten ominaislämmönkulutus saadaan täsmennettyä.
Maalämpöpumppujen päästöt	<ul style="list-style-type: none"> Sähkön päästökerroin 164 g CO₂/kWh, v 2018 Sähkön päästökerroin 95 g CO₂/kWh, v 2030 Maalämpöpumpun lämpökerroin 3 	<p>Sähkön päästökerroin perustuu Ilmastolaskurin tietoihin ostosähkön päästökertoimesta Suomessa (5 vuoden keskiarvo).</p> <p>Päästökertoimen oletetaan laskevan vuoteen 2030 mennessä uusiutuvan energian lisäyksen vuoksi.</p> <p>Maalämpöpumpun lämpökerroin perustuu KAISUn menetelmäkehikon oletuksiin.</p>

Kuten yllä olevasta taulukosta näkee, myös skenaarioiden laskentaan liittyy monenlaisia epävarmuuksia ja oletuksia.

Itse päästövähennyksen kustannustehokkuuslaskenta on suoritettu vertaamalla perusuraa eri skenaarioihin vuosikohtaisesti. Tarkastelu on tehty erikseen kustannusten osalta ja päästöjen osalta, ja lopuksi yhdistetty kustannussäästölaskelmissa. Alla oleva kuva kertoo laskentakaavan:

Kuva 7-3 Esimerkkilaskennan laskentakaava yksinkertaistettuna

Kustannussäästön laskeminen

$$LTK = \text{ÖLk} - \text{VLak}$$

LTK = Lisätoimen kustannussäästö

ÖLk = Öljylämmityksen kustannus

VLak = Vaihtoehtolämmitys B:n kustannus (maalämpöpumput)

$$\text{ÖLk} = \text{ÖLm} \cdot \text{ÖLh}$$

ÖLm = Öljylämmityksen määrä valtionhallinnossa, MWh-lämpö / a

ÖLh = Öljylämmityksen muuttuva kustannus, EUR / MWh-lämpö

$$\text{VLak} = \text{VLAi} + \text{VLAm} \cdot \text{VLAh}$$

VLAi = Maalämmön investointikustannus, EUR / a

VLAm = Maalämmön määrä valtionhallinnossa, MWh-lämpö / a

VLAh = Maalämmön muuttuva kustannus, EUR / MWh-lämpö

$$\text{ÖLm} + \text{VLAm} = 100 \% \text{ valtionhallinnossa tuotetusta lämmöstä}$$

Päästövähennyksen laskeminen

$$LTP = \text{ÖLp} - \text{VLAp}$$

LTP = Lisätoimen päästövähennys

ÖLp = Öljylämmityksen päästö

VLAp = Maalämmön päästö

$$\text{ÖLp} = \text{ÖLm} \cdot \text{ÖLco2}$$

ÖLm = Öljylämmityksen määrä valtionhallinnossa, MWh-lämpö / a

ÖLco2 = Öljylämmityksen CO₂-päästö, CO₂ / MWh-lämpö

$$\text{VLAp} = \text{VLAm} \cdot \text{VLAco2}$$

VLAm = Maalämmön määrä valtionhallinnossa, MWh-lämpö / a

VLAco2 = Maalämmöstä aiheutuva CO₂-päästö, CO₂ / MWh

Jokaisena vuotena on siis vertailtu yksittäistä skenaariota ja perusuraa keskenään ja laskettu tarvittavien maalämpöpumppujen määrän erotus MWh-lämpönä. Tästä on johdettu vuosittainen kustannus laskemalla erikseen vuosittaiset kiinteät maalämpöpumppuinvestoinnit ja muuttuvat kustannukset. Investointikustannukset on allokoitu tarkasteluperiodin ajalle jakamalla investointien määrä elinkaarella, kuitenkin painottaen investointeja enemmän kunakin vuonna tapahtuvilla investoinneilla. Koska investointilaskenta ei ole täysin realistinen, laskenta on myös hyvin esimerkinomainen, eikä

esimerkiksi nettohyötyarvoja ole järkevää tarkastella yksityiskohtaisesti eri skenaarioiden välillä. Tarkempi laskentakaava on esitetty liitteessä 4.

Kustannukset on diskontattu käyttäen diskonttauskorkoa 3,5 %, jota pidetään yleisesti tyypillisenä sosiaalisena diskonttauskorkona. Diskonttaus lisää jälleen yhden epävarmuustekijän laskentaan. Käyttämällä yleistä diskonttauskorkoa tätä epävarmuutta voidaan vähentää ja parantaa eri selvitysten välistä vertailukelpoisuutta.

Keskeiset lopputulokset eri skenaarioiden osalta on koottu seuraavaan taulukkoon.

Taulukko 7-10 Eri skenaarioiden päästövähennysten kustannustehokkuus-laskennan vertailu

Aihe	Skenaario 1 (lineaarinen)	Skenaario 2 (nopea tiputus)	Skenaario 3 (myöhäinen tiputus)
Päästöjä säästetty perusura vs. skenaario, kumulatiivinen	703 000 tCO _{2e}	1 816 000 tCO _{2e}	480 000 tCO _{2e}
Päästövähennyksen kumulatiivinen kustannussäästö	-11 EUR/tCO _{2e}	-23 EUR/tCO _{2e}	-26 EUR/tCO _{2e}

Kuten taulukosta voi tulkita, skenaarion valinnalla on huomattava vaikutus päästövähennysten kustannustehokkuuteen. Mikäli laskennassa olisi käytetty yksityistä diskonttauskorkoa (7 %), säästöjen nykypäiväarvo olisi vähentynyt merkittävästi, mikä olisi korottanut kustannussäästöä voimakkaasti.

Esimerkilaskennan johtopäätöksenä voikin sanoa, että yksittäisten laskuotusten lisäksi laskentaan liittyy myös merkittävä oletus siitä, tarkastellaanko kustannuksia ja päästöjä kumulatiivisesti vai tiettyinä ajankohtana. Kaikissa skenaarioissa lopputulos on sama vuonna 2030: öljylämmitys on vähentynyt nolnaan prosenttiin, mutta muutoksen vauhti vaikuttaa voimakkaasti lopputulokseen kustannusten kautta. Yksittäisen vuoden tarkastelun voikin nähdä antavan vain osittaisen kuvan tilanteesta.

Suoraviivaisen laskennan nähdään sopivan tälle kyseiselle rakennussektorin esimerkille suhteellisen hyvin, sillä toimenpiteellä ei ole merkittäviä rinnakkaisvaikutuksia muihin toimenpiteisiin tai muihin sektoreihin, koska vaikutuksen kohde on niin rajattu. Toimenpiteellä ei ole myöskään juurikaan epäsuoria tai transaktiokustannuksia. Lämpöpumppujen lisääntynyt määrä tuskin vaikuttaa sähkön hintaan tai sähköverkon kuormitukseen merkittävästi.

Esimerkkilaskennassa ei ole toistaiseksi otettu huomioon kansantaloudellisia vaikutuksia tai ristikkäisvaikutuksia esimerkiksi sosioekonomisiin ajureihin. Työpajan osallistujat myös toivoivat laajaa ja selkeätä nykytilanneselvitystä. Tulevien ilmastostrategioiden ja toimenpide-ehdotusten osalta esitettiin myös toive, että ristikkäisvaikutukset erityisesti muille politiikan osa-alueille otettaisiin paremmin huomioon.

7.3 Maatalous

7.3.1 Maataloussektori päästövähennysten laskentanäkökulmasta

Maataloussektorin päästöjen osuus taakanjakosektorista on noin viidennes. Päästövähennystoimien kustannustehokkuuslaskennan kannalta maataloussektori on haastava kokonaisuus, sillä riippuen toimenpiteestä ja kasvihuonekaasupäästöstä, maatalouden piirissä syntyviä päästöjä raportoidaan kolmella eri sektorilla. Maatalouden metaani- ja dityppioksidipäästöt, jotka ovat pääasiassa peräisin tuotantoeläimistä, lannasta ja maaperästä, raportoidaan maataloussektorilla. Maankäyttösektorilla (LU-LUCF) raportoidaan maatalousmaahan liittyvät hiilidioksidipäästöt lukuun ottamatta kalkituksen päästöjä, jotka raportoidaan maataloussektorilla. Lisäksi maatalouden työ-koneiden ja kiinteistökohtaisen lämmityksen päästöt raportoidaan energiasektorilla.

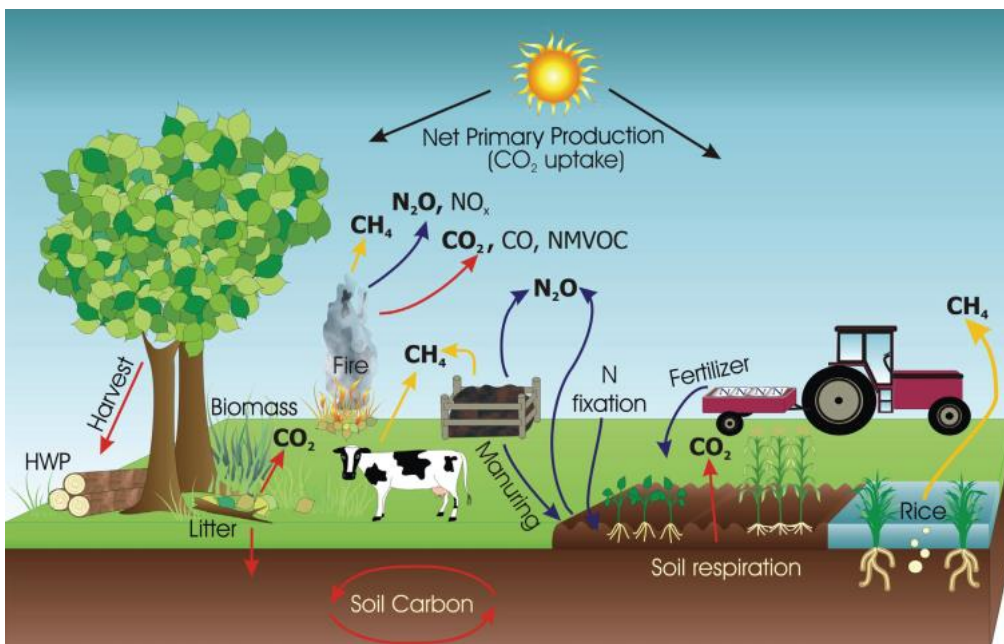
Maataloussektorin päästövähennyksiin tähtäävät toimenpiteet ovat keskenään luonteeltaan erilaisia ja niillä voi olla vaikutuksia myös muille sektoreille. Esimerkiksi bio-kaasun tuotannon myötä kotieläinten lannasta syntyvä päästökuorma vähenee, mutta tuotannosta aiheutuvat päästöhyödyt lasketaan liikennesektorilla.

Maataloussektorin päästöt riippuvat mm. seuraavista tekijöistä:

- Kotieläinten ruuansulatuksesta ja lannan käsittelystä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt
- Maaperään sitoutuneen orgaanisen hiilen vapautuminen ilmakehään viljelytoimenpiteistä (maanmuokkaus)
- Viljellyt kasvilajit ja tilojen tuotantosuunnat yleisesti
- Maaperän kasvipeitteisyyden pysyvyys
- Kalkitusaineiden ja väkilannoitteiden käyttömäärät
- Tilojen ja peltujen sijainti sekä tilakoko, erityisesti karjatiloilta

Kustannustehokkuuslaskennassa on käsitelty nimenomaan maataloussektorin toimenpiteiden päästöjä. Kasvihuonekaasupäästöt maataloudessa aiheutuvat pääasiassa maaperän ja lannan käsittelystä. Keskeisimmät päästöt ovat lannankäsittelystä aiheutuva hiilidioksidi (CO₂), maaperän ja lannankäsittelyn typpioksiduuli (N₂O) sekä metaani (CH₄). Niiden lähteitä, nieluja ja aineiden kiertoa on kuvattu havainnollistaen seuraavassa kuvassa (Kuva 7-4).

Kuva 7-4 Maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöjen lähteet, nielut ja kierrot (IPCC 2006)



Koska eri toimenpiteiden toteuttamiseen ja niistä aiheutuvien päästövähennysten sekä kustannusten määrään vaikuttaa merkittävästi biologiset, maantieteelliset ja yksittäisiä maatiloja koskevat olosuhteet, eri toimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointia varten on vaikea kehittää yhtä yleisesti pätevää laskentamallia. Tämän lisäksi toimenpiteet ovat keskenään hyvin erilaisia.

Maataloussektorilla myös epäsuorien vaikutusten lukumäärä on merkittävä tekijä. Epäsuorat vaikutukset ja eri sektoreiden välillä olevat ristikkäiset vaikutukset voivat vääristää päästövähennysten hyötyjä maataloussektorilla. Esimerkiksi joidenkin päästövähennystoimenpiteiden, kuten biokaasun tuotannon, vaikutukset lasketaan pääosin toisen päästökaupan ulkopuolisen sektorin, liikenteen, hyväksi. Lisäksi toimenpide voi vaikuttaa työkoneiden päästöihin.

Maataloussektorin päästölaskentaan vaikuttavia muuttujia ja sitä kautta ristikkäisiä ja epäsuoria vaikutuksia tarkastellaan yleisellä tasolla seuraavassa taulukossa (Taulukko 7-11). Tarkastelussa on huomioitu kaksi erilaista maatalouden päästövähennystoimenpidettä, biokaasun tuotannon lisääminen ja eloperäisten maiden viljely monivuotisesti muokkaamatta. Taulukossa esitetty listaus erilaisista ristikkäisistä vaikutuksista ei siten ole kattava, mutta antaa osviittaa minkälaisia eri vaikutuksia maataloussektorilla esiintyy.

Taulukko 7-11 Esimerkkejä ristikkäisistä ja epäsuorista vaikutuksista maataloussektorilla

Vaikutusosa-alue	Esimerkki
Polkuriippuvuudet	Biokaasun tuotannon kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi markkina- ja kilpailutilanne kyseisellä alueella, biokaasun yleinen kysyntä ja kaasujoneuvojen käyttömäärä sekä kysyntä kyseisellä hetkellä. Biokaasun tuotannon tukemisella on investointien kannalta merkittävä vaikutus. Myös muilla biokaasun liikennekäyttöön kohdistuvilla toimilla on epäsuoria vaikutuksia. Lisäksi maatalouden saralla biokaasun tuotannon houkuttelevuuteen ja kannattavuuteen vaikuttaa toimijaan kohdistuvat taloudelliset riskit, joita olisi tärkeä pystyä jakamaan myös muilla tavoin. Biokaasun tuotannon kannattavuuteen maaseudulla vaikuttaa myös eri tilojen yleinen kannattavuus ja tulonlähteet.
Kompensaatiovaikutukset	Toimenpiteistä aiheutuvia kompensatiovaikutuksia voivat olla esimerkiksi maankäytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Epäsuoria kompensatiovaikutuksia ovat muun muassa lannoitteiden ja ravinteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt ja toisaalta niiden väheneminen biokaasun tuotannon ansiosta ravinteiden kierrätystä tehostamalla.
Sektorien väliset riippuvuudet	Eloperäiset maiden käsittelystä syntyvät CO ₂ -päästöt sisältyvät LULUCF-sektoriin, jolloin niiden osalta vaikutukset eivät näy maataloussektorin laskennassa. Kuitenkin eloperäisistä maista aiheutuvat päästöt ovat kokonaisuudessaan merkittäviä. Jos biokaasua ohjataan liikennekäyttöön, päästövähennykset lasketaan liikennesektorin hyödyksi. Biokaasuntuotannolla on käytettyjen jäteraaka-aineiden ja syntyvien sivutuotteiden kautta myös yhteys jätehuoltosektorille ja teollisuussektorille. Näissä tapauksissa kustannusvaikutukset siirtyvät eri sektorille.
Toimenpiteiden päällekkäiset vaikutukset	Toimenpiteillä voi olla päällekkäisiä vaikutuksia, esimerkiksi kierrätyslannoitteiden valmistamisen ja biokaasun tuotannosta syntyvän mädätysjäännöksen käyttö lannoitteena. Luonnonvarakeskuksen tuoreen selvityksen (Luonnonvarakeskus 2019) mukaan esimerkiksi nurmi viljeltynä yksinomaan bioenergian tuotantoa varten (kuten biokaasun tuotanto) ei ole kestävää, mutta käyttö lisäsyötteenä tai ylijäämänurmen (kuten viherlannoitusnurmi) käyttö on päästövähennysten näkökulmasta järkevää.

Maatalouden päästövähennystoimenpiteiden eroavuuksien vuoksi on myös haastavaa kehittää yhtä yhtenäistä perusuraa. Esimerkiksi eloperäisten maiden viljelyssä nykytasolla voidaan tarkoittaa joko karjatiloilla edelleen tapahtuvaa metsän raivaamista nurmiviljelyyn ja lannan levitykseen tai perinteistä viljanviljelyä, josta siirrytään esimerkiksi suorakylvöön. Päästövähennystoimenpiteille tulisikin kehittää erilliset perusurat. Päästövähennystoimenpiteestä riippumatta luontevinta on verrata kasvihuonekaasujen päästövähennystä tilanteeseen, jossa analysoitavaa vähennystoimea ei toteuteta.

Maataloussektorille sisältyy kuitenkin myös aiemmin raportissa kuvattuja ns. no-regrets -menetelmiä. Näitä ovat mm. lannoituksen tekninen tarkentaminen, muokkauksen keventäminen sekä vähempituottoisten viljelyalojen jättäminen viherkesannolle rehuviljan viljelyn sijaan.

Horisontti 2020 -rahoitteisessa maataloustuotteiden kestävästä tehostamisesta tutki-
neessa SUSTAg-hankkeessa (Lehtonen et. al. 2019) biokaasun tuotannon perus-
urana on käytetty riittävän suuren karjatilan 30 vuoden historiatietoja, ja tulevaisuuden
skenaario huomioi vuosien 2040–2069 kasvihuonekaasupäästöt. Perusura voisi tä-
män mukaisesti olla ns. mallitila, jonka koko on arviolta 100–120 lehmää. Biokaasun
tuotannon lisäämisen osalta skenaario voisi perustua tilakohtaiseen energiaomavarai-
suuteen, sillä tämän työn yhteydessä järjestetyssä työpajassa todettiin biokaasun laa-
jamittaisen siirron liikennekäyttöön olevan monissa tapauksissa teknisesti haastavaa.

Maataloussektorin sosiaaliset vaikutukset kohdistuvat maankäyttöön ja sen muutok-
seen, ruoan alkutuotantoon ja elinkeinonharjoittamiseen. Olennainen haaste maata-
loudessa on toteuttaa ruoantuotanto siten, että maaperän päästöt ovat mahdollisim-
man vähäiset maatalouden elinkeinoa vaarantamatta tai toimeentuloa heikentämättä.
Tavoitteeseen pääsy vaatii taloudellisia ohjauskeinoja, esimerkiksi lisätukia tai haitta-
korvauksia. Maatalouden tukia ei huomioida kustannusten laskennassa, mutta esi-
merkiksi maaseudun kehittämissuunnitelman kautta voidaan kompensoida toimenpiteistä
aiheutuvia kustannuksia. Eloperäisten maiden viljelyn vähittäinen lopettaminen tai
siirto monivuotiseen viljelyyn muokkaamatta voi vaatia isoja muutoksia ja sitä kautta
aiheuttaa kustannusvaikutuksia, jotka kohdistuvat suoraan viljelijään.

Kustannusten arvioinnissa keskeistä on, että maatilan omistaja tai viljelijä itse on toi-
menpiteen kohteena, mikä aiheuttaa maataloussektorin kustannustehokkuuden las-
kentaan erilaisen näkökulman muihin sektoreihin nähden. Useat päästövähennystoi-
menpiteet edellyttävät mm. maankäytön, viljelytoimenpiteiden tai jopa tuotannon muu-
toksia, jotka vaikuttavat suoraan yksittäisten tilojen elinkeinoin ja aiheuttavat sitä
kautta mahdollisesti myös suoria kustannusvaikutuksia.

7.3.2 Päästövähennysten kustannustehokkuuden laskenta maataloussektorilla

Maataloussektorilla päästövähennystoimien kustannustehokkuus ilmaistaan usein ra-
jakustannuskäyrillä eli MAC-käyrillä. MAC-käyrät esittävät yleensä maatalouden osa-
alueen eri toimien päästövähennyspotentiaalin suhteessa niiden kustannuksiin tietyllä
maantieteellisellä alueella. Tämän vuoksi MAC-käyrällä esitettävät tulokset ovat sekä

alueellisesti että sektorillisesti sidottuja, eivätkä esitä esimerkiksi sektorin ulkopuolisten päästöjen vähenemisen rajakustannusta. (Eory ym. 2018)

MAC-käyrää muodostettaessa tulee kiinnittää huomiota valittaviin toimenpiteisiin. Valinnassa tulee huomioida niiden olennaisuus ja soveltuvuus suhteessa maatalousjärjestelmään, jota tutkitaan, niiden vaikutukset tuottavuuteen tai ympäristön tai eläinten hyvinvointiin sekä toimenpiteiden hyväksyttävyyden maanviljelijöiden keskuudessa. Lisäksi tulee pohtia, kuinka paljon matalan sosiaalisen hyväksyttävyyden tason teknisiä toimenpiteitä voidaan huomioida. Valinnassa tulee huomioida myös toimenpiteiden laajuus; ovatko ne ainoastaan yksittäisiä toimia vai systeemisiä muutoksia. Valittaessa sopivia päästövähennystoimenpiteitä tulee kiinnittää huomiota myös niiden absoluuttiseen päästövähennyspotentiaaliin (kuinka suuriin päästöihin toimenpiteellä voidaan vaikuttaa), toimenpiteen päästövähennystehokkuuteen sekä päästövähennysten kustannuksiin (Eory ym. 2018).

MAC-käyrän tuottamia päästövähennystuloksia verrataan lopuksi vielä päästöjen referenssiskenaarioon, mikä on voitu laskea jollekin tietylle vuodelle tai ajanjaksolle. Koska maataloudessa tehtävät toimenpiteet, hinnat ja teknologia muuttuvat ajan myötä, referenssiskenaariovuoden valinta on merkityksellinen tulosten kannalta (Eory ym. 2018).

Laskettaessa toimenpiteiden kustannustehokkuutta tulee huomioida mitä kaikkia kuluja laskelmissa on otettu huomioon. Valtion tukien tai verojen sekä erilaisten yksityisille ja julkisille toimijoille kohdistuvien transaktiokustannusten huomioiminen tai huomiotta jättäminen voivat merkittävästi vaikuttaa kustannustehokkuuteen ja eri toimien väliseen kustannustehokkuusjärjestykseen (Eory ym. 2018).

Maataloussektoria koskevien päästövähennystoimien kustannustehokkuuden laskentaa tarkasteltiin eri maista saatujen esimerkkien avulla (Suomi, Saksa ja Iso-Britannia). Suomen osalta tässä selvityksessä kustannustehokkuuden arvioinnin lähteenä on käytetty mm. Suomen ilmastopaneelin raporttia 1/2014 (Ollikainen ym. 2014), Suomen ilmastopaneelin muistiota keskipitkän aikavälin ilmasto-ohjelman menetelmäkehikosta (Ollikainen ym. 2016), Maatalouden keskipitkän aikavälin sektorisuunnitelmaa (Maa- ja metsätalousministeriö 2017) ja kasvintuotannon sekä biokaasun tuotantomenetelmien kustannustehokkuutta (Luonnonvarakeskus 2015a ja Lehtonen ym. 2019).

Saksa

Vuonna 2016 PwC selvitti Saksassa tehtävien päästövähennystoimien kustannustehokkuutta eri sektoreilla, mukaan lukien maatalous. Kaikkien toimien arvioinnissa on

käytetty yksittäismallinnusta. Perusura ja lasketut skenaariot vaihtelevat tarkasteltujen esimerkkien välillä.

Yksi esimerkki maataloussektorin toimista on ohjauskeino, joka perustuu lannoiteuudistukseen ja sen avulla saavutettavaan päästövähennykseen. Lannoiteuudistuksen tarkoituksena on rajoittaa lannoitteena käytettävän typen määrää. Tätä verrataan nykytilanteeseen, jossa typen käyttömäärä lannoitteena on suurempi. Perusuraan on kuvattu maatalouden käytössä olevan viljelypinta-alan muutos, jonka odotetaan vähenevän perustuen julkisesti saatavilla olevaan dataan. Tämä vähentää samalla myös väkilannoitteiden käyttöä ja siten päästöjä, vaikka väkilannoitteiden käyttömäärä per hehtaari ei pienenekään. Myös päästökerroin pysyy samana tarkastelujakson aikana.

Lannoiteuudistuksen käyttöönotossa tarkastellaan vuonna 2020 säästyviä päästöjä ja kumulatiivisesti tarkastelujakson ajalta. Laskennan lähtökohtana on vuosi 2016, koska säädös tuli voimaan vuonna 2015. Tarkastelujaksona/elinkaarena on 10 vuotta, koska lannoitesäädökset päivitetään noin 10 vuoden välein. Päästölaskennassa on käytetty lannoitteen sisältämän typen kasvihuonekaasupäästökerrointa, joka pysyy vakiona koko tarkastellun elinkaaren ajan.

Toinen esimerkki on ohjauskeino, jonka tarkoitus on lisätä luomutuotannon määrää Saksassa ja siten laskea väkilannoitteista aiheutuvia typpi- ja CO₂-päästöjä. Perusuraan on kuvattu maatalouden käytössä olevan pinta-alan muutos samoin oletuksien kuin lannoiteuudistustoimen kohdalla. Luomuviljelyalan oletetaan lisääntyvän 2 % vuosien 2015-2020 välillä johtuen saatavilla olevista tukirahakannustimista ja ekologisen viljelyn oletetaan syrjäyttävän muun viljelyn pinta-alaa. Luomuviljelyn lisääntymisen oletetaan vähentävän typpi- ja CO₂-päästöjä, sillä väkilannoitteita käytetään vähemmän kuin tavanomaisessa tuotannossa. Tarkastelujaksona/elinkaarena on kuuden vuoden periodi 2015–2020, jolloin on saatavilla toimeen kannustavia tukirahoja.

Jokaisen toimen kohdalla määritetään ohjelmakustannukset (hallinnolliset kustannukset), bruttokustannukset ja säästetyt energiakustannukset (mikäli näitä on). Lannoiteuudistuksen kohdalla on laskettu kertaluontoinen suora kustannus kansantaloudelle (joka kohdentuu maataloudelle) sekä vuosittaiset suorat kustannukset kansantaloudelle (jotka kohdentuvat maataloudelle) ja osavaltioiden viranomaisille. Säästyneitä energiakustannuksia ei tämän toimenpiteen kohdalla ole, sen sijaan on laskettu säästynyt resurssintarve, joka perustuu tarvittavan lannoitemäärän vähenemiseen.

Luomuviljelyn lisäämisen kohdalla on laskettu vuotuiset bruttokustannukset perustuen saatavilla olevaan tukirahamäärään ja jyvitetty se lisääntyneen luomuviljelyalan hehtaarimäärään. Tukirahasta lasketaan Saksan valtion maksama osuus, joka on 56 %. Toimen kohdalla ei ole tunnistettu säästyneitä energiakustannuksia.

Maatalouteen liittyvien eri toimien kohdalla on huomioitu lannoiteudistuksen vaikutus muihin toimiin, joissa lannoitteiden päästöillä on vaikutusta päästövähennyslaskentaan. Muihin sektoreihin ei ole tunnistettu päällekkäisyyksiä, jotka tulisi ottaa erikseen huomioon laskennassa. Tarkastelu rajautuu maataloussektorin sisälle.

Muita hyötyjä ja kansantaloudellisia vaikutuksia ei tarkastella erikseen yksittäisille toimille, vaan ne lasketaan yhteisesti kaikille raportissa esitellyille toimille. Tarkasteltavia vaikutuksia ovat esimerkiksi vaikutukset työllisyyteen ja BKT:seen.

Iso-Britannia

CCC on arvioinut maataloussektorin päästöjä taustaselvityksessä viidettä hiilidioksidibudjetin laatimista varten. Maataloussektorin toimet pohjautuvat vahvasti erilliseen selvitykseen, jota tarkasteltu erikseen tässä raportissa. (CCC, 2015b)

Iso-Britanniassa tarkastellut päästövähennystoimet on jaettu neljään kategoriaan, joita ovat: 1) toimet, jotka vähentävät maaperän käsittelyn aiheuttamia päästöjä, 2) toimet, jotka vähentävät viljelyn aiheuttamia päästöjä, 3) toimet, jotka vähentävät kotieläinten pidon aiheuttamia päästöjä ja 4) muut toimet. Näiden yläkategorioiden alla on käsitelty yksityiskohtaisempia toimia, kuten typen käytön tehostamista ja kotieläinten ravinnon laadun parantamista. Maataloussektorille tehdyssä analyysissä tarkastellaan toimia ensin maatilatasolla, jonka jälkeen lopputulokset on aggregoitu.

Selvityksessä tarkemmin tarkastellut toimet on karsittu muutamaaan valikoituun päästövähennyskeinoon laajemmasta listasta mahdollisia toimia. Tarkastellut toimet on valikoitu kolmen kriteerin avulla: 1) niillä on keskiarvoinen tai suuri vähennyspotentiaali, 2) ne ovat järkevästi toteutettavissa ja robusteja ja 3) niillä on vähäinen riski eikä niillä ole negatiivisia vaikutuksia esim. eläinten hyvinvointiin. Perusskenaario on rakennettu eri päästövähennystoimista, mutta raportissa ei ole eritelty miten toimet on valittu osaksi skenaariota.

Selvityksessä on arvioitu yksittäisten toimien toteuttamiskelpoisuutta, päästövähennyspotentiaalia, käyttöönottoa nyt ja tulevaisuudessa sekä kustannuksia ja kustannustehokkuutta. Toimien kustannustehokkuus on laskettu nettonykyarvon ja saavutettujen päästövähennysten kautta koko päästövähennyksen elinkaaren ajalta seuraavasti:

$$\text{Kustannustehokkuus} = \frac{\text{Toimen nettonykyarvo}}{\text{Saavutettujen päästövähennysten diskontattu summa}}$$

Nettonykyarvo huomioi kustannukset ja rahalliset hyödyt diskontattuna toimen koko elinkaaren ajalta. Kustannuslaskentaa varten on laskettu myös saavutettujen päästö-

vähennysten samalla kertoimella diskontattu summa koko elinkaaren ajalta. Diskonttauskerroinena analyysissä käytettiin joko 3,5 % tai 7 %, joista ensimmäinen on sosiaalinen diskonttauskerroin ja jälkimmäinen on henkilökohtainen diskonttauskerroin. Sosiaalisella diskonttauskerroimella tarkoitetaan kerrointa, jolla voidaan arvioida yhteiskunnallisten investointien ja projektien arvoa. Se on tyypillisesti suhteellisen matala, ja siinä painottuu tulevaisuudessa saadut hyödyt.

Toimien välinen riippuvuus on otettu huomioon koostettaessa päästövähennysten kustannuskäyrää. Riippuvuuksien laskenta seuraa Moran ym. (2008) esittämää metodologiaa päällekkäisten vaikutusten huomioimiseksi. Esimerkiksi typpipitoisten lannoitteiden korvaamisella sekä lannoitteiden käytön tehostamisella on päällekkäisiä vaikutuksia. Eri toimien yhteisvaikutus arvioitiin käyttämällä yhtälöä:

$$DLA'_{k,l} = (DLA_k + DLA_l) * IF_{k-l}$$

DLA' kuvaa kahden päästövähennystoimen summaa elinkaaren ajalta (DLA = Discounted Lifetime Abatement), DLA kuvaa yksittäisten toimien itsenäistä päästövähennystä, myös diskontattuna elinkaaren ajalta ja IF (Interaction Factor) kuvaa toimien välistä riippuvuutta. Yksinkertaistuksen vuoksi yhteisvaikutus seuraavalla menetelmällä: Valitaan kaikista yksittäisistä toimista kustannustehokkain, jonka jälkeen seuraavien toimien vähennyspotentialiaali päivitetään kaavalla:

$$DLA'_{k,l} = DLA_k + DLA_l * IF_{k,l},$$

jossa DLA_k on ensimmäisenä valittu toimi. Tämän jälkeen valitaan seuraavaksi kustannustehokkain toimi ja prosessi toistetaan. Jos riippuvuuskerroin on tasan 1, toimet eivät vaikuta toisiinsa ja jos riippuvuuskerroin on alle 1, niin toimien yhteisvaikutus on pienempi kuin niiden erillinen summa. Selvityksessä arvioitiin kaikille toimille niiden ristikkäisvaikutukset muiden toimien kanssa. Lisäksi selvityksessä huomioitiin mahdollisuus toimien eri käyttöönottomäärille maatasolla seuraavalla kaavalla:

$$DLA'_l = DLA_l * (1 + IF_{k,l} * \frac{Impl_{k,l}}{Impl_l}),$$

jossa $Impl_{k,l}$ kuvaa osuutta alueesta tai kokonaisuudesta, jossa molemmat toimet on otettu käyttöön ja $Impl_l$ kuvaa osuutta, jossa vain yksi toimi on otettu käyttöön.

Analyyisin lopputuloksena on muodostettu päästövähennysten rajakustannuskäyrä, joka ottaa huomioon toimien päällekkäiset vaikutukset. Lisäksi sekä yksittäisille toimille että kokonaisuudelle on tehty herkkyystarkasteluja eri skenaarioiden avulla ja arvioitu eri toimien käyttöönoton ja seurannan helppoutta. (Ricardio & SRCU, 2015)

Suomi

Tämän hankkeen yhteydessä järjestetyssä työpajassa hahmoteltiin, miltä osin muualla käytetyt mallit ovat käyttökelpoisia Suomen olosuhteissa. Suomessa viljelyn aiheuttamista päästöistä merkittävin päästövähennys saavutetaan eloperäisten maiden järkevällä käytöllä, kuten eloperäisten maiden metsityksellä tai monivuotisella viljelyllä muokkaamatta. Eläintenpidon, etenkin karjatilojen, aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä keskeisintä ovat lannan varastointi- ja käsittelymenetelmät. Tämän vuoksi toimenpiteenä käsitellään lannan hyödyntämistä biokaasun tuotannon raaka-aineena. Selvitystä varten työn aikana pidetyssä työpajassa määritettiin toimenpiteen kustannustehokkuuslaskentaa varten tarpeellisia tietoja, kuten laskentayksiköitä, perusuraa ja muita laskentatekijöitä.

Epäsuorat vaikutukset

Laskennan yksinkertaistamisen vuoksi on syytä sulkea epäsuorat kustannukset laskennan ulkopuolelle. Osa epäsuorista kustannushyödyistä on kuitenkin tarpeellista pitää mukana tarkastelussa. Esimerkiksi biokaasun tuotannossa syntyvä mädätejäännös on hyvää lannoitetta, jota käyttämällä voidaan saada kustannussäästöjä väkilannoitteiden hankinnassa. Tämä toteutuu kuitenkin ainoastaan suuremman mittakaavan laitoksen myötä, jolloin syntyvä mädätejäännös voidaan käsitellä tiiviimmäksi lannoitevalmisteeksi ja kuljettaa kustannustehokkaasti myös kauempana sijaitseville tiloille. Kemiallisella menetelmällä tuotettujen typpilannoitteiden valmistus vaatii paljon energiaa, jolloin niiden korvaaminen lantapohjaisilla lannoitevalmisteilla vähentää epäsuoria päästöjä teollisuussektorilla.

Ristikkäisvaikutukset

Kustannusten arviointi maataloussektorilla on haastavaa, koska kustannuksiin vaikuttaa suoraan tilakoko ja tuotanto. Eloperäisten maiden osuus viljelysmaasta on suurin niissä osissa Suomea, joissa maataloustuotanto on voimakkaimmin nautakarjatalousvaltaista. Nautakarjatilojen pinta-alasta suuri osa on yleensä rehunurmien tuotannossa, mutta myös rehuviljoja viljellään yleisesti. Kotieläinyksiköiden koon kasvu ja eläinmäärän lisääminen synnyttävät näillä alueilla tarvetta pellon raivaukseen. Uutta peltoa tarvitaan sekä rehuntuotantoon että säädösten vaatimaksi lannanlevitysalaksi. Siten eloperäisten maiden viljelykäytäntöjen muuttaminen ei ole ongelmaton.

Koska biokaasulaitosten kannattavuus on suoraan verrannollinen tilakokoon (suuri alkuperäinen investointi), eloperäisillä mailla rehunurmen viljelyyn tarvittava viljelysala voi myös olla edellytyksenä biokaasuinvestoinnille (Lehtonen ym. 2019). Biokaasutuotannon kustannustehokkuus riippuu paljolti siitä, kuinka monen eläimen lantaa laitoksella käsitellään. Kustannusten ja taakanjakosektorin kokonaispäästövähennysten kannalta

olennaista kuitenkin on myös se, että syntyvä biokaasu saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti. Mikäli biokaasun tuotantoa tuetaan, mutta sitä ei voida hyödyntää kokonaan, menee toimenpiteestä saatava hyöty osittain hukkaan.

Eloperäisten maiden metsityksen tavoitteena on optimoida maankäyttöä siten, että kasvihuonekaasupäästöjen määrä olisi mahdollisimman vähäinen maatalouden elinkeinoa vaarantamatta tai toimeentuloa heikentämättä. Tämän toimenpiteen osalta vaikeinta on määrittää laskennan aikaväli ja diskonttaus. Viljelijälle aiheutuu myös tulonmenetystä, sillä metsittämisen jälkeen ko. alalle ei enää makseta maataloustukea. Puun myyntiuloja on sen sijaan odotettavissa vasta kymmenien vuosien päästä.

Kustannukset ja kohdistuminen

Keskipitkän aikavälin ilmasto-ohjelman menetelmäkehikko ja tietotarpeen arviointi -muisti-ossa ympäristöministeriölle on arvioitu kustannuksia eri toimenpiteille maataloussektorilla (Ollikainen ym. 2016). Vuosittain saavutettavien toimenpidekohtaisten päästövähennysten perusteella (arvioitu Ollikainen ym. 2014) on laskettu yhteiskunnallisia ja yksityisiä kustannuksia vuositasolla. Toimenpiteiden yksityiset kustannukset koituvat kuluttajille tai kotitalouksille ja ne on laskettu ilman yhteiskunnallisia tukia. Toimenpidekohtaisten ohjauskeinojen tyyppejä ja kustannuksia on myös arvioitu, mutta suppeasti. Esimerkiksi maataloutta koskevien toimenpiteiden osalta pellonraivauksen rajoittamista oli arvioitu vain verokustannuksena (ehdotettu raivausvero eloperäisillä mailla 285 EUR/ha 10 v ajan) ja biokaasutusta investointitukena. Myös esimerkiksi ohjauskeino viherkesantoon siirtymisestä eloperäisillä mailla oli määritelty tueksi tai määräykseksi, mutta tuen tai tulonmenetysten suuruudesta ei ollut arvioissa tietoa.

Suorat kustannukset maataloussektorin päästövähennystoimenpiteestä on perusteltu Ilmastopaneelin raportissa 1/2014 esimerkiksi lannoitemäärän vähenemisen aiheuttamana säästönä ja viljeltävän kasvin vaihtamisen osalta suorien kustannusten muutoksena (eri viljelykasveilla voi olla erilaiset viljelyn suorat kustannukset). Sen sijaan yhteiskunnallisten kustannusten muodostumisen lukuja ei ole perusteltu. Ilmastopaneeli arvioikin, että pitkäaikaisen laskennan luotettavuuden vuoksi, lukujen lähdetieto tulisi dokumentoida raporteissa (Ollikainen ym. 2016).

Perusurana aiemmissa tutkimuksissa on yleisesti käytetty maataloustuotannon nykytilaa. Muilta osin tarkasteltavat toimenpiteet eroavat toisistaan, eikä yhteneviä tapoja ole mahdollista määritellä.

Taulukko 7-12 Yhteenveto maatalouden tarkastelutavoista eri maiden esimerkkiraporteissa

Saksa (PwC 2016)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Tutkimuksessa selvitetään kaikkien kvantifioitavissa olevien päästövähennystoimenpiteiden päästövähennyspotentiaali sekä kustannustehokkuus. Maatalouden ja maankäytön osalta raportissa on kvantifioitu neljä esimerkkiä. Perusura riippuu laskettavasta toimenpiteestä; alla on kuvattu muutama esimerkki. Lannoiteuudistus: perusuraan on kuvattu maatalouden käytössä olevan pinta-alan muutos, jonka odotetaan vähenevän julkisesti saatavilla olevaan dataan perustuen. Tämä vähentää samalla myös väkilannoitteiden käyttöä ja siten päästöjä, vaikka väkilannoitteiden käytön määrä per hehtaari ei pienenekään. Myös päästökerroin pysyy samana tarkastelujakson aikana. Luomuviljely: perusuraan on kuvattu maatalouden käytössä olevan pinta-alan muutos samoin oletuksien kuin lannoiteuudistustoimenpiteen kohdalla.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Lannoiteuudistus: lakiuudistuksen tarkoituksena on vähentää lannoiteista aiheutuvia typpipäästöjä. Käytetyn lannoitteen määrä (kg per ha) tulee pienenevän, mikä vaikuttaa kokonaispäästöihin (typpi-kg / ha). Tätä verrataan nykytilanteeseen, jossa lannoitteen ja typen määrä / ha on suurempi. Tarkastelujaksona/elinkaarena on 10 vuotta, sillä historiallisesti samansisältöinen lakiuudistus on tapahtunut noin 10 vuoden välein. Luomuviljely: toimenpide laskee luomuviljelyn lisäämisen vaikutuksia typpi- ja CO₂-päästöihin. Luomuviljelyalan oletetaan lisääntyvän 2 % vuosien 2015-2020 välillä saatavilla olevista tukirahakannustuksista johtuen ja sen oletetaan syrjäyttävän muun viljelyn pinta-alaa. Luomuviljelyn lisääntymisen oletetaan vähentävän typpi- ja CO₂-päästöjä, sillä väkilannoitteita käytetään vähemmän. Tarkastelujaksona/elinkaarena on kuuden vuoden periodi 2015-2020, jolloin on saatavilla toimeen kannustavia tukirahoja.
Mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> Yksittäismallinnus kaikkien toimenpiteiden kohdalla. Maatalouteen liittyvien eri toimenpiteiden kohdalla on huomioitu lannoiteuudistuksen vaikutus muihin toimenpiteisiin, joissa lannoitteiden päästöillä on vaikutusta päästövähennyslaskentaan. Muihin sektoreihin ei ole tunnistettu päällekkäisyyksiä, jotka tulisi ottaa erikseen huomioon laskennassa.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Jokaisen toimenpiteen kohdalla määritetään ohjelmakustannukset (hallinnolliset kustannukset), bruttokustannukset ja säästetyt energiakustannukset (mikäli näitä on). Lannoiteuudistus: toimenpiteen kohdalla on laskettu kertaluontoinen suora kustannus kansantaloudelle (joka kohdentuu maataloudelle) sekä vuosittaiset suorat kustannukset kansantaloudelle (jotka kohdentuvat maataloudelle) ja osavaltioiden viranomaisille. Säästyneitä energiakustannuksia ei tämän toimenpiteen kohdalla ole, sen sijaan on laskettu säästynyt resurssintarve, joka perustuu tarvittavan lannoitemäärän vähenemiseen. Luomuviljely: toimenpiteen kohdalla on laskettu vuotuiset bruttokustannukset perustuen käytettävissä olevaan tukirahamäärään ja jyvitetty se lisääntyneen luomuviljelyalan hehtaarimäärään. Tukirahasta lasketaan Saksan valtion maksama osuus, joka on 56 %. Toimenpiteen kohdalla ei ole tunnistettu säästyneitä energiakustannuksia.

Saksa (Bayerische Landesamt für Landwirtschaft 2017)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Baijerin Landesamt für Landwirtschaftin tekemä esiselvitys vuodelta 2017 kuvaa Baijerin alueen maataloussektorin kasviuonekaasupäästöjen ja kustannusten kytkemistä toisiinsa. Raportissa tarkastellaan maidontuotantoa noin 370 baijerilaisella maatilalla vuosina 2011–2013, mikä toimii laskennan perusurana.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Päästövähennyspotentiaalia ja kustannustehokkuutta on tarkasteltu vertailemalla eri tilojen päästöjä ja tunnistamalla suurimpia päästöjen lähteitä. Mikäli päästöjen määrä on tarpeeksi merkittävä ja määrässä on suuri varianssi eri tilojen välillä, tässä on julkaisun mukaan todennäköisesti myös suuri päästövähennyspotentiaali. Tarkastelu on tehty ”multiskaalamallilla”, jossa otetaan huomioon eri tasoja/vaihtoehtoja kasviuonekaasupäästöjen vähentämisen laskemisessa. Mallissa tarkastellaan liiketoimintaa, tuotteita ja tuotantotapaa sekä maataloustoiminnan pinta-alaa, jotka muodostavat mallin ”skaalat”. Tästä saadaan tietoja siitä, miten päästöjä voidaan vähentää parhaiten kullakin eri tasolla ja perusteita ohjauskeinojen pohtimiseen.
Mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> Ristikkäisvaikutuksia ja alueellisia päällekkäisyysvaikutuksia pyritään eliminoidaan tarkastelemalla multiskaalamallin eri tahoja/skaaloja. Ristikkäisvaikutuksia muihin toimialoihin ei ole käsitelty. Analyysiin on käytetty ”dominanssianalyysiä” selvittämään niitä päästölähteitä, joissa olisi suurin päästövähennyspotentiaali. Käytännössä dominanssianalyysi perustuu useisiin, jaksottaisiin regressioanalyysihin, jotka tarkastelevat kasviuonekaasupäästöjen variaatiota. Päästövähennyskertoimet ja muut oletukset perustuvat selvityksen aikana saatavilla olleisiin IPCC:n tietoihin. Päästöjen kohdalla on tarkasteltu sekä suoria että epäsuoria päästöjä ja nämä on listattu erilliseen taulukkoon.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Kustannustehokkuutta ja päästövähennyskustannusten määrää on arvioitu regressioanalyysillä tarkastelemalla maatilan tekemää voiton suhteessa karjan määrään ja käytössä olevaan pinta-alaan. Laskentatapa pohjaa havaintoon, jossa maatilan pinta-ala ja karjan määrä ovat tärkeimpiä vaikuttajia kasviuonekaasupäästöjen määrään. Kustannusten kohdentumista tai diskonttausta ei ole käsitelty erikseen.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Julkaisussa ei ole tarkasteltu muita hyötyjä. Erikseen mainitaan, että karjan hoidosta vapautuvaa työaikaa ja sen vaihtoehtoista käyttötapaa ei ole huomioitu laskelmissa.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Raportissa esitetään N₂O- ja CH₄-päästöjen laskukaavat. Päästötiedot on myös yhdistetty maatilakohtaisiin avainlukuihin (esimerkiksi voitto, pinta-alan käyttötarkoitus, tuotantotekniset avainluvut). Skaalakohtaiset tulokset esitetään regressioanalyysin kuvaajina. Julkaisussa esitetään myös keskimääräinen kasviuonekaasupäästöjen vähenemiskustannus yksikössä EUR/tCO₂e.

Iso-Britannia (Eory et. al. 2015)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Maatalousmaan käytön, metsäpinta-alan ja eläintenpidon tämänhetkinen tilanne.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Tutkimuksessa selvitetään siinä läpikäydyn 24 päästövähennystoimen päästövähennyspotentiaali, merkitys päästövähennystoimena sekä kustannustehokkuus. Oletuksena on, että yksittäisen

Iso-Britannia (Eory et. al. 2015)	
	<p>päästövähennystoimenpiteen päästövähennyspotentiaali on lineaarinen sen käyttömäärään nähden.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tutkimuksessa oletetaan, että eri päästövähennystoimilla on erilainen käyttöpotentiaali: matala käyttöpotentiaali, keskitason käyttöpotentiaali sekä korkea käyttöpotentiaali. Eri käyttöpotentiaalien toimenpiteille on käytössä myös erilaisia politiikkatoimia, joilla toimenpiteitä voidaan edistää. • Oletuksena maatalousmaan määrä pysyy 2014 tasolla. • Oletuksena metsien määrä pysyy vuoden 2014 tasolla, mikä lisääntyy vuosittain Forestry Commissionin arvioimalla istutusmäärällä. Näin ollen vuoteen 2035 mennessä istutetaan 98 000 ha lisää metsää ja laidunmaa vähenee vastaavasti. • Oletuksena yli 5 vuotta vanhan ruohoalueen ja sikojen käytössä olevien ulkoalueiden määrä pysyy vuoden 2014 tasolla. • Oletuksena kokonaisviljelyala pysyy vuoden 2014 tasolla. • Neljä FAPRI-UK-hankkeessa (2015) arvioitua viljelykasvia: määrä lisääntyy FAPRI-UK:n arvion mukaan 84 000 ha eli noin 2,2 %. Vastaavasti väliaikaisen nurmen määrä vähenee 6 % eli 84 000 ha 2014-2035. Tuotantoarviot pohjautuvat huhtikuussa 2015 voimassa olleisiin toimintatapoihin, keskimääräisiin sääoloihin, tarkkoihin makroekonomisiin oletuksiin ja öljyn hintoihin (Afbj 2015).
Mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> • Päästövähennyksen laskenta on pyritty tekemään samalla tavalla kuin IPCC:n 2006 päästölaskenta. • Päästövähennystoimien tehokkuutta arvioidaan vuoden pituisilta toimilta vuoden ajalta ja sitä pidemmiltä toimilta keskimääräisen vuosittaisen päästövähennyspotentiaalilla. • Päästövähennyksen kustannustehokkuutta arvioidaan vuosittaisen diskontatun elinkaaren pohjalta. Toimenpiteen kustannukset lasketaan yksikkökustannusten nettohyötyarvon summana elinkaaren ajalta, samalla tavalla kuin CCC tekee. • Jokaisen toimenpiteen kohdalla eritellään minkä tason käyttöpotentiaali toimenpiteelle oletetaan ja lasketaan sen skenaarion pohjalta toimenpiteen kustannustehokkuus. • Laskennassa on käytetty kahta eri diskonttauskorkoa - sosiaalista (3,5 %) ja yksityistä (7 %). • Jokaisen yksittäisen toimenpiteen päästövähennyskyky on laskettu yksikön eliniän aikana tuottaman vähennyksen summana (diskonttauskorko 3,5 %). Toimenpiteen kustannustehokkuus saadaan laskemalla netto-hyötyarvo diskontatulla päästövähennyksellä. • Laskennassa huomioitiin, että samaan aikaan käytettynä eri päästövähennystoimet voivat aiheuttaa ristikkäisvaikutuksia ja laskea päästövähennystehokkuutta. Tulokset on raportoitu sekä ristikkäisvaikutusten kanssa että ilman niitä. Ristikkäisvaikutukset huomioitiin kuten vuonna 2008 tehdyssä maatalous MACC:ssa (yksi kerrallaan). • Taloudelliset ristikkäisvaikutukset arvioitiin pieniksi eikä niitä huomioitu laskennassa.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> • Teknologiset kustannukset maatilalla. • Jokaisen päästövähennystoimen osalta on tehty oletuksia siihen liittyvistä kustannuksista sekä maatilatasolla että alueellisella tasolla. Käytetyt kustannusoletukset perustuvat muihin tutkimuksiin ja ne on esitetty jokaisen toimenpiteen kohdalla erikseen.

Iso-Britannia (Eory et. al. 2015)	
	<ul style="list-style-type: none"> Toimenpiteiden nettokustannukset arvioitiin teknologisten kustannusten ja päästövähennyksen tilatasolla tuoman hyödyn perusteella. Ei huomioitu transaktiokustannuksia tai epäsuoria vaikutuksia.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Muita hyötyjä ei tarkastella.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Eri toimenpiteiden kustannukset (£/t CO₂e-1) ja niiden päästövähennyspotentiaali (ktCO₂e y-1) on esitetty MACC-käyrillä vuosina 2030 ja 2035.

Iso-Britannia, metsitys (Nijnik ym. 2013)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Vähätuottoisen maatalousmaan metsittämättä jättäminen.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Vähätuottoisen maatalousmaan metsitys eri metsitysmäärillä. Korkeiden päästöjen skenaario: ei metsitystä. Keskisuurten päästöjen skenaario: metsitystä vuodesta 2005 vuoteen 2020 vuoden 2005 metsitystason mukaisesti. Matalien päästöjen skenaario: vuosittain 30 000 ha metsitys.
Mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> Laskennassa verrataan metsityksen ja metsittämättä jättämisen taloudellisia hyötyjä eri menetelmillä. Tutkimuksessa selvitetään myös eri alueiden metsittämisen kustannuksia per sidottu tonni hiiltä. Hiilivirtojen summaustavalla laskettaessa lasketaan vuosittaisten hiilivirtojen summa kummankin toimenpiteen osalta ja hyöty saadaan niiden erotuksena. Keskimääräisen hiilivaraston laskemisen menetelmällä lasketaan keskimääräinen hiilivarasto kummankin toimenpiteen osalta ja hyöty saadaan niiden erotuksena. Diskonttausmenetelmällä laskettaessa lasketaan kummankin toimenpiteen vuosittainen hiilivirta diskontattuna toimenpiteen ajalta ja hyöty saadaan niiden erotuksena.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Metsittämisen marginaalikustannus vaihtelee maan alkuperäisen käytön ja alueen mukaan. Laskelmassa huomioidaan puun alueellinen hinta, puun istutuskustannukset, julkinen ja yksityinen diskonttauskorko, ja maapohjan markkina-arvo. Tutkimuksessa ei ole tarkennettu kenelle kustannukset kohdentuvat. Laskelmassa on käytetty 3,5 % julkista ja 7 % yksityistä diskonttauskorkoa.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> Marginaalikustannuksen esitystapa: £/tC
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Muita hyötyjä ei tarkastella.

Iso-Britannia, metsitys (CJC Consulting 2014)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Maatalousmaan metsittämättä jättäminen.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Metsän istutus erilaisille maaperille, joissa aiemmin on ollut tuotantoeläinten laidunmaita sekä joissain tapauksissa viljelyskelpoista maata tai väliaikaisesti nurmea. Laskennan aika huomioi toimenpiteet vuodesta 2014 vuoteen 2200 asti. Laskennassa on käytetty myös aikahorisontteja vuosiin 2030, 2050 ja 2100 asti.

Iso-Britannia, metsitys (CJC Consulting 2014)	
Mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> Metsän erilaisille maille istuttamisen vaikutus hiilensidonnan hintaan. Laskennassa ei oteta huomioon maaperästä vapautuvia hiilipäästöjä tai puutuotteiden päästöjä.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Laskennassa otetaan huomioon maaperän hinta, metsityksen ja metsänhoidon kustannukset, hiilen ja puun hinta. Diskonttauskorko pienenee, mitä pidemmälle ajassa mennään (3,5 % ... 2,0 %) Selvityksessä ei ole kerrottu kenelle kustannukset kohdentuvat.
Tulosten esitys	<ul style="list-style-type: none"> £/ tCO₂e (fyysinen mitta) £/ £ (CO₂e) (arvon mitta). Ottaa huomioon hiilen oletetun hinnan nousun ajan edetessä.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Ei huomioi muita hyötyjä.

Suomi, biokaasu (Lehtonen ym. 2019)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> 120 lehmän tila, jossa ei tuoteta biokaasua, tilan lämmöntuotanto perustuu joko puu- tai öljylämmitykseen.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Oletus on, että mautiloilla on mahdollista saada kolmas ruuhosato, josta voitaisiin yhdessä lehmän lannan kanssa tuottaa biokaasua. Biokaasun tuotantotarkastelu tehty kahdenlaiselle tilalle: 1) 120 lehmän tila (2 lypsyrobotia) ja 2) 180 lehmän tila (3 lypsyrobotia).
Mallinnusmenetelmät (ja ristikkäisvaikutukset)	<ul style="list-style-type: none"> Laskelmissa selvitettiin yksittäisellä mautilalla toimivan biokaasulaitoksen kannattavuutta verrattuna tilanteeseen, jossa tilojen lämmitys tapahtuu puulla tai öljyllä. Biokaasulaitosten sähkön ja lämmön tuotantolaskelmat tehtiin erikseen kummallekin tilakoolle (120 tai 180 lehmää). Laskelmassa käytetyt parametrit perustuivat LUKEn Maaningan tutkimusaseman biokaasulaitoksen energiantuotannon ja tilan energiatarpeen parametreihin. Oletuksena CHP-laitoksen sähköteho on 31 % ja lämpöteho 62 %. Kummankin tilakoon kannattavuuslaskelma on tehty 100 % (teetetty tuotantolaitos) ja 75 % (itse tehty tuotantolaitos) investointiosuuksilla nykyisistä markkinahinnoista. Kannattavuuslaskelmat tehtiin erikseen 50 % ja 75 % lämmön talteenotolla.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Biokaasulaitoksen alkuinvestoinnin kustannukset ovat suuret ja kohdentuvat viljelijälle. Investointi on kustannustehokkaampaa suuremmalla mautilalla. Toisaalta viljelijä säästää jatkossa sähkö- ja lämmityskuluissa. Biokaasua voidaan mahdollisesti myös myydä, jolloin viljelijä saa lisätuloja. Jos biokaasua myydään liikennekäyttöön päästöhyöty kohdentuu liikennesektorille.
Tulosten esittely	<ul style="list-style-type: none"> Alkuinvestointikustannus EUR/kWh
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Selvityksessä todettiin, että ylimääräistä biokaasua voidaan myydä myös tilan ulkopuolelle, jolloin kasvihuonekaasupäästöjä voidaan alentaa myös tilan ulkopuolella, kuten liikennesektorilla. Biokaasun myynti liikennekäyttöön vaatii kuitenkin biokaasun tuotantopaikkojen läheisyyteen kaasutankkausasemia, jotta biokaasua voidaan myydä kaasautojen käyttäjille.

Suomi (Ollikainen ym. 2016, Ollikainen ym. 2014)	
Perusura	<ul style="list-style-type: none"> Tilanne, jossa muutoksia nykytilaan ei tehdä.
Skenaario	<ul style="list-style-type: none"> Ohralla viljelty eloperäinen maa 1) metsitetään, 2) ohjataan pitkäaikaiseen viherkesannointiin (tarkastelussa eloperäinen ja kivennäismaa) 3) Karjatilalla viljellään nurmea, joka jatkossa käytetään biokaasun tuotantoon. Toimenpiteitä on tarkasteltu 100 000 ha alalle, potentiaaliset saavutettavat päästövähennykset on laskettu vuositasolla. Vastaavat kustannukset toimenpiteen suorittamisesta vuoden aikana on laskettu yhteiskunnalle ja yksityiselle toimijoille (kuluttajat/kotitaloudet).
Mallinnusmenetelmät	<ul style="list-style-type: none"> Yksittäiskohtainen mallinnus toimenpidekohtaiseksi. Eri toimenpiteiden päästövähennyspotentiaalia ja kustannuksia on tarkasteltu yhden vuoden ajalta toimenpiteen suorittamisesta. Biokaasun riskit huomioidaan 3 % ja 5 % korkovaatimuksilla.
Kustannukset ja kohdentuminen	<ul style="list-style-type: none"> Toimenpiteiden yhteiskunnallinen kustannus [EUR/tCO₂e] ja toimenpidekohtainen yksityinen kustannus (EUR/yksikkö, esim. ha). Laskelmissa otetaan huomioon kustannukset viljelijälle ilmoitettuna EUR/ha ja yhteiskunnalliset kustannukset EUR/tCO₂e sekä EUR/tN₂O Eloperäisten ja kivennäismaiden metsityksen kustannuksina huomioidaan päästöjen vähentyminen, viljelijän kustannus päästöjen vähenemisestä (eli tulonmenetykset, joka koituu ilmastotoimien toteuttamisesta) sekä yksikkökustannukset vähennettyä CO₂e-tonnia kohden. CO₂e-päästöjen ilmastohaitan arvona pidetään 35 EUR/tCO₂e. Viherkesannointiin vaihtamisen kustannuksena huomioidaan menetetty voitto, joka olisi saatu ohran viljelystä. Huomioon otettavia kustannuksia ovat väkilannoituksen vähentämisen aiheuttamat kustannukset sekä eloperäisillä että kivennäismaalla kun päästöjä halutaan vähentää 15 %. Kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen otetaan huomioon sekä tuotannon vähenemisenä että typpilannoitetun pellon päästöjen vähenemisenä.
Tulosten esittely	<ul style="list-style-type: none"> EUR/tCO₂e esitettynä portaittaisena kustannusfunktiona päästöjen vähennystoimista ja niiden kustannukset järjestettynä halvimmasta kalleimpaan.
Muiden hyötyjen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> Toimenpiteitä on tarkasteltu erikseen

Edellä esitettyyn taulukkoon on koottu erilaisten maataloussektorin päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuusanalyyskejä. Selvityksiä on erityisesti haluttu tarkastella metsityksen näkökulmasta, koska tähän raporttiin rakennettu maataloussektorin esimerkkilaskenta keskittyy eloperäisten maiden metsittämisen tarkasteluun. Maataloussektorin laskentaesimerkki eloperäisten maiden metsitykselle on kuvattu luvussa 7.3.4.

Useat taulukoiduista toimenpiteistä suosivat perusuran valinnassa sellaista määritettyä, joka kuvastaa nykytilaa tai tilannetta ennen päästövähennystoimenpiteen implementointia. Skenaarioissa on heti huomattavasti variaatioita, koska skenaariotarkastelu on pitkälti toimenpidesidonnaista. Skenaariossa esimerkiksi tarkasteltava ajanjakso voi olla laskennassa kuluvina vuosina kuvaamassa toimenpiteen kestoja tai las-

kettu suhteessa tiettyyn tavoiteltavaan päästövähennysvuoteen. Mallinnusmenetelmissä yksittäismallinnus on suosiossa ja ristikkäisvaikutuksia on pyritty välttämään. Kustannusten arvioinnissa diskonttaus korkoa ei joko ole mainittu tai käytetty tai se vaihtelee eri selvitysten välillä. Monessa toimenpideselvityksessä toinen käytetty diskonttaus korko on 3,5 %. Selvityksissä kustannusten kohdistumista ei ole aina avattu tarkasti tai siihen ei ole otettu lainkaan kantaa. Suositun kustannustehokkuuden tulosyksikkö on rahayksikköä per tonnia hiilidioksidiekvivalenttia (esim EUR/tCO_{2e}).

7.3.3 Yhteenveto analyysimenetelmistä

Maataloutta koskevassa työpajassa tarkasteltiin keskipitkän aikavälin ilmastopoliittikan suunnitelmassa (KAISU) tunnistettuja toimenpiteitä, erityisesti eloperäisten maiden metsitystä, biokaasun tuotannon lisäämistä sekä eloperäisten maiden viljelyä monivuotisesti muokkaamatta. Työpajan yhteenveto on tämän raportin liitteenä (liite 1).

Laskentamenetelmiin otettiin kantaa työpajassa (Ryhmä A). Työpajassa ehdotettiin, että laskentamenetelmissä tulee hyödyntää sekä kansallisella että kapeammalla tasolla raportoituja tilastoja lähtötietoina. Päästölaskennan rajauksessa olisi kannattavaa keskittyä vain suoriin päästölähteisiin ja hiilinieluihin. Kustannusten osalta suoria ja kansantaloudellisia kustannuksia pidettiin olennaisina.

Ryhmä B keskittyi pääasiassa erilaisten ristikkäisvaikutusten tunnistamiseen maataloussektorilla. Merkittäviä sektorien välisiä ristikkäisvaikutuksia ei tunnistettu työpajassa, vaan päästöjen ja kustannusten muodostumiseen vaikuttavien tekijöiden todettiin tapahtuvan maataloussektorin sisällä. Lisäksi ryhmässä nostettiin esille, että huomattava määrä epävarmuutta sisältyy MAC-käyrä-tyyliisiin esitystapoihin ja vastaaviin vertailuihin.

Lisäksi työpajan tuloksena todettiin, että kaikkien maataloussektorin toimenpiteiden toteuttamista ei voi ajatella, vaan ongelmaa on lähdeävä ratkaisemaan siten, mitkä toimenpiteet ovat yksittäin tarkasteltuna edullisempia päästövähennysten saavuttamiseksi. Todettiin myös, että arvioitujen päästövähennysten tulisi korreloida Suomen KHK-päästöinventaarion kanssa.

Maataloussektorilla tehtävien päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden laskennassa on usein keskitytty yksittäismallinnukseen (PwC 2016, Ollikainen ym. 2014, Ollikainen ym. 2016 ja Maa- ja metsätalousministeriö 2017).

Päästövähennysten kustannustehokkuuden laskennassa on tarkasteltu eri osapuolille koituvia kustannuksia. Viljelijälle koituvat kustannukset kuvaavat tulon menetystä, joka viljelijälle aiheutuu ilmastotoimenpiteen toteuttamisesta. Kustannus voidaan määrittellä

alkuperäisen voiton ja toteuttamisesta aiheutuvan uuden tulon erotuksena (Ollikainen ym. 2014). Kustannuksia valtiolle voidaan arvioida tarvittavien kompensaatikustannusten kautta. Lisäksi yhteiskunnalle koituvia kustannuksia voidaan laskennallisesti arvioida erikseen.

Eloperäisten maiden viljelyn muutos esimerkiksi ohran viljelystä pitkäaikaiseen nurmi-
viljelyyn vaatisi maataloustukien rakenteellisen muutoksen, jotta viljelijöillä olisi halua ja kannustimia edistää hiilen laajamittaista sidontaa. Nurmelle voisi olla monenlaista käyttöä, kuten esimerkiksi biokaasulaitoksen raaka-aineena, mutta siihen liittyy kuitenkin tulojen (kustannusten) lisäksi myös muita reunaehtoja, kuten ns. RED-
direktiivin kestävyysvaatimukset. Biokaasulaitosten rakentaminen arvioidaan realistiseksi vaihtoehdoksi kuitenkin silloin, kun investointeihin saatava tuki on riittävä ja tuotettavalla biokaasulla on hyvä korvaussuhde.

Maataloussektorin päästölaskennan yleinen epävarmuus on arvioitu korkeaksi (Maa- ja metsätalousministeriö 2017, Ollikainen ym. 2016). Jopa 60 prosentin arvioitu epävarmuus on suurempi kuin millään muulla sektorilla. Suuri epävarmuus päästöjen laskennassa johtaa siihen, että myös päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointiin kohdistuu epävarmuuksia.

Työpajassa pidettiin hyvänä käytäntönä yksinkertaistaa laskentaa rajaamalla pääosa epäsuorista kustannuksista, kuten esimerkiksi lannoitteiden valmistuksen ja työkoneiden polttoainekulutuksen kustannukset, laskennan ulkopuolelle. Mädätysjäännöksen käyttö lannoitteena katsottiin kuitenkin merkittäväksi epäsuoraksi vaikutukseksi.

Tarkkoja lähtötietoja maatilakohtaiselle laskennalle on vaikea määrittää, ja esitettyjen tietojen lähteitä tai perusteluja on harvoin saatavilla. Toisin sanoen lähtötietojen taustalla tapahtuvaa laskentaa ei ole esitetty läpinäkyvästi, mikä lisää tietopohjan epävarmuutta ja vaikeuttaa laskentojen päivittämistä vertailukelpoisella tavalla. On myös argumentoitu, että tietopohjan kasvattaminen ei tehokkaasti pienennä päästölaskennan epävarmuutta. Epävarmuus maataloussektorin päästölaskennassa johtuu enimmäkseen biologisten tekijöiden vaihtelusta ja systeemien moninaisuudesta verrattuna esimerkiksi polttoperäisiin päästöihin.

Olemassa olevien laskentojen herkkyyksianalyysiä ei voida suorittaa tietämättä lähtötietojen epävarmuuksia ja niihin liittyvien laskentojen taustoja.

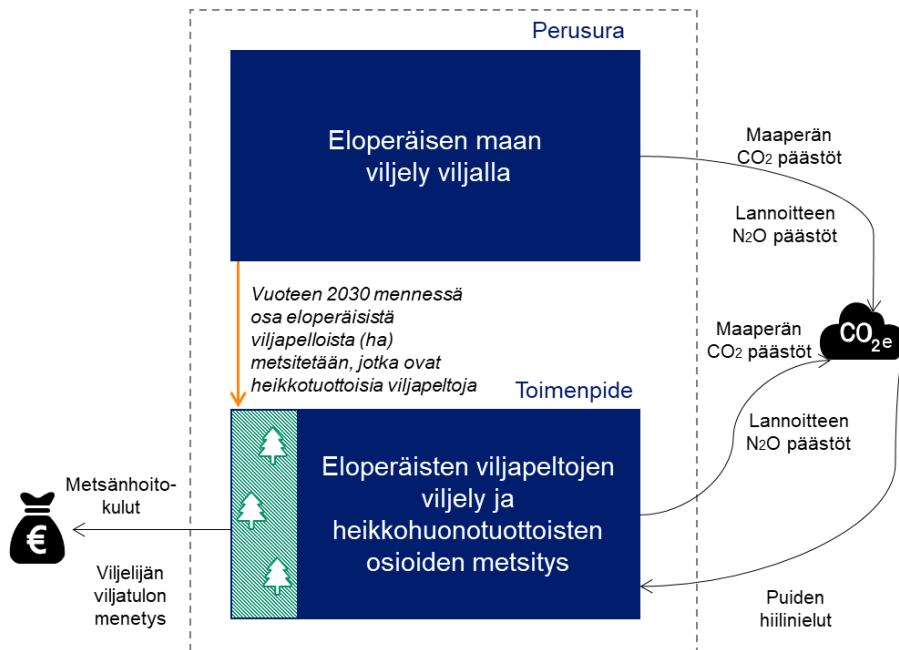
7.3.4 Esimerkkilaskenta maataloussektorilta

Tässä luvussa on suoritettu maataloussektorille kohdistuva toimenpide. Kyseessä on esimerkkilaskenta, jolla on pyritty havainnollistamaan laskentaan liittyviä epävarmuuksia, muuttujia ja kysymyksiä. Maataloussektorin päästövähennystoimenpiteet ovat kytköksissä muihin sektoreihin. Tässä laskentaesimerkissä tarkasteltu toimenpide koskettaa niin maatalous-, kuin LULUCF-sektoria.

Alla oleviin taulukoihin on listattu käytettyjä lähtötietoja koskien perusuran ja toimenpiteen muodostamista. Tässä laskentaesimerkissä tarkastellaan perusurana Suomessa tapahtuvaa eloperäisten maiden viljelyä. Viljatyyppeihin ei oteta tässä laskennassa kantaa. Perusuran tarkastelussa päästölähteistä otetaan huomioon vain maanmuokkauksesta aiheutuvan maaperästä vapautuvan hiilen kasvihuonekaasupäästöt, koska eloperäinen peltomaa sisältää hyvin paljon hiiltä.

Tarkasteltavaksi toimenpiteeksi on valittu eloperäisten maiden metsitys, joka on esitetty alla olevassa kuvassa. Toimenpiteessä toimii perustana eloperäisten maiden viljan viljely, josta ns. heikkotuottoiset peltoalueet halutaan metsittää. Tässä laskennassa on käsitelty viljan viljelyssä olevia eloperäisiä maita, joista heikkotuottoinen osuus (arvioitu 10 %) metsitetään. Toimenpiteen oletetaan olevan valmis vuonna 2030, jolloin silloisista eloperäisistä viljapelloista olisi metsitettynä 10 % ja loput 90 % eloperäisistä peltomaista olisi edelleen viljelykäytössä. Metsitys aloitetaan jo vuonna 2019 ja sitä jatketaan tasaisesti aina vuoteen 2030 asti. Vastaavasti eloperäisen viljelysmaan pinta-ala pienenee.

Kuva 7-5 Esimerkkilaskennan perusrassa ja toimenpiteessä huomioitavat kasvihuonekaasujen päästölähteet, hiilinielut ja kustannukset esitettynä; laskennassa käsitellään heikkotuottoisilla eloperäisillä mailla viljeltyä viljaa ja näiden alojen metsitystä



Päästövähennyksiä tarkasteltaessa tässä toimenpiteessä korostuu erityisesti hiilinielujen merkitys. Puiden hiilinielutarkastelussa on otettu huomioon vain maanpinnan yläpuolella kasvava puumassa eli puun juuria ei ole otettu laskennassa huomioon. Hiilinieluja on arvioitu istutettavien mäntyjen kasvun perusteella (m³) puun eri ikävuosina. Metsä kasvatetaan hiilinieluksi, eikä sen loppukäyttöä ole tässä tarkasteltu. Laskelmissa oletetaan, että metsää ei harvenneta eikä hakata, kun se jätetään kasvamaan hiilinieluksi. Kun hakkuita ei tarkastella, siitä syntyvän puumateriaalin loppukäyttö on rajattu tästä tarkastelusta pois. Hiilinielujen lisäksi toimenpiteeseen on sisällytetty eloperäisten maiden maanmuokkauksesta aiheutuvat maaperän hiilidioksidipäästöt sekä eloperäisillä mailla käytetyn typpipitoisen väkilannoitteen aiheuttamat dityppioksidipäästöt. Maaperän hiilikierron ja hiilivarastojen laskennalliseen arvioimiseen liittyy paljon epävarmuustekijöitä, joita ovat esimerkiksi mikrobitoiminnan, maankäytön historian, kasvuympäristön, puulajien, ilmaston ja vuodenaikaisvaihtelun vaikutukset.

Metsitystoimenpiteen kustannuksiin on arvioitu eri metsänhoitotoimien kustannusvaihteluksia. Huomioituja metsänhoitotoimia ovat istutus (ml. maanmuokkaus) ja mekaaninen heinäntorjunta. Metsitystoimien lisäksi toimenpiteestä aiheutuvia kustannuksia syntyy viljeltävän viljan tuotannon vähenemisestä ja sen seurauksena viljatulon menetyksestä, joka menetetään sen tilalle istutetun metsän vuoksi. Esimerkkilaskennassa ei oteta huomioon kuluja, joka ottaisi kantaa siihen, että metsitykseen käytettävä vilja-

ala tulisi hankkia muualta. Menetetyn viljatulon kustannuksista on tehty useita skenaarioita, koska laskentaa varten ei ollut tietoa heikkotuottoisen eloperäisen pellon viljatulon arvosta. Esimerkkilaskennassa tehtiin myös erikseen herkkyyshanalyysi ottamalla kustannuksiin mukaan maanviljelijän perustuen menetys metsitetystä peltoalasta.

Esimerkkilaskennan ensimmäinen tarkasteluvuosi on 2019, jolloin männyn istutukset aloitetaan. Laskennan perusuran ja toimenpiteen elinkaari on laskettu 45 vuoden ajalle, joten aikataustelu ulottuu vuodesta 2019 vuoteen 2063. Tässä laskennassa on oletettu 45 vuoden jälkeen hiilinielun olevan suurimmillaan, jonka jälkeen on oletettu hiilinielun pysyvän kutakuinkin samana tai peräti laskevan. Tämän vuoksi laskennan elinkaari on rajattu 45 vuoteen. Kustannukset ja päästöt tai hiilinielut on siis huomioitu tämän määritetyn elinkaaren ajalta.

Taulukko 7-13 Perusuran muodostaminen maataloussektorin esimerkki-laskennassa

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset	Epävarmuustekijät ja kommentit
Suomessa olevien eloperäisten viljapeltojen määrä ja kehitys	<ul style="list-style-type: none"> Eloperäistä peltomaata Suomessa on arvioitu olevan 364 400 ha (2019). Eloperäisistä maista viljapelloja 43 %. Arvioidaan eloperäisiä viljapelloja olevan 156 692 ha vuonna 2019. Luku kasvaa vuosittain 1100 ha/a 	<p>Peltomaata on noin 2,4 milj. ha ja kansallisen luokituksen mukaan tästä 0,35 milj. ha (15 %) on eloperäistä maata. Tämä Luken taloustohtorista saatava lähtötieto pinta-alamääristä on vuodelta 2011 (Luonnonvarakeskus, 2011). Eloperäisten maiden alana nousee 1100 ha vuodesta 2015 eteenpäin (Maa- ja metsätalousministeriö 2017). Oletetaan eloperäisen maan pinta-alan olevan 0,35 milj. ha 2011–2014, jonka jälkeen se nousee vuodesta 2015 eteenpäin 1100 ha/v aina vuoteen 2098 asti.</p> <p>Nurmen osuus eloperäisillä mailla 57 % (Maa- ja metsätalousministeriö 2017). Oletetaan lopun 43 % eloperäisistä maista olevan viljapelloja.</p>
Eloperäisen maan viljelystä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt	<ul style="list-style-type: none"> Hiiltä vapautuu maaperästä 1,5 t C/ha/a 1 t C vastaa 3,7 t CO₂e Eloperäisen maanmuokkauksen päästökerroin 0,4 t CO₂e/ha/a 	<p>Eloperäisen maan muokkaus vapauttaa hiiltä maaperästä 1-2 t/ha/a (Ollikainen ym. 2014). Laskennassa käytetään tästä keskiarvoa eli maanmuokkauksesta vapautuu hiiltä 1,5 t/ha/a. 1 tonnin hiilen vapautuminen vastaa 3,7 t CO₂e (IPCC 2007).</p>
Väkilannoitteen käytöstä aiheutuvat dityppioksidipäästöt	<ul style="list-style-type: none"> Väkilannoitteesta syntyvät päästöt eloperäisen maan viljelyssä 715 kg CO₂e/a 	<p>Typpipohjaisesta väkilannoitteesta syntyvät dityppioksidipäästöt muutettuna hiilidioksidekvivalenteiksi. (Ollikainen ym. 2014, taulukko 2)</p>
Maanviljelijän tulo viljasta	<ul style="list-style-type: none"> 220 EUR/ha/a 	<p>Laskennallinen arvo lähtötiedoista (Ollikainen ym. 2014) s. 9.</p>

Taulukko 7-14 Skenaarioiden muodostaminen maataloussektorin esimerkkilaskennassa

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset	Epävarmuustekijät ja kommentit
Suomessa olevien eloperäisten viljapeltojen ja metsitetyn alan määrä	<ul style="list-style-type: none"> Eloperäisten maiden jatkuva nousu on otettu huomioon myös tässä. Heikkotuottoisia peltoaloja oletetaan olevan 10 % eloperäisten viljapeltojen alasta (ha). Vuonna 2030 eloperäisistä viljapelloista on metsitetty 10 % (heikkotuottoiset alueet). Vuonna 2019 eloperäistä peltoa viljalla on skenaariossa 155 258 ha ja vuonna 2098 vastaava ala on 151 913 ha. Eloperäistä maata on metsitetty 1407 ha (2019), 16 879 ha (2030). 	<p>Katso perustelut perusurasta.</p> <p>Heikkotuottoisten peltoalojen määrä ja skenaarion oletukset perustuvat Pöyryn arvioihin. Tämä ala metsitetään vuoteen 2030 mennessä eli vuonna 2030 eloperäisistä viljapelloista on metsitetty 10 %.</p> <p>Vuonna 2019 eloperäisiä viljapelloja on 155 258 ha. Tämä määrä laskee tasaisesti vuosittain määrään 151 913 ha vuoteen 2030 mennessä, joka vastaa 90 % vuoden 2030 eloperäisistä maista.</p> <p>Eloperäisistä maista on metsitetty vuoteen 2030 mennessä 16 879 ha (10 %). Tämän jälkeen eloperäisten viljapeltojen ja metsäalueen pinta-alat pysyvät vakiona vuodesta 2030 aina vuoteen 2063 asti.</p>
Eloperäisen maan viljelystä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt	<ul style="list-style-type: none"> Eloperäisen maanmuokkauksen päästökerroin 0,4 t CO₂e/ha/a 	Katso perustelut perusurasta.
Väkilannoitteen käytöstä aiheutuvat dityppioksidipäästöt	<ul style="list-style-type: none"> Väkilannoitteesta syntyvät päästöt eloperäisen maan viljelyssä 715 kg CO₂e/a 	Katso perustelut perusurasta.
Metsityksestä syntyvät hiilinielut	<ul style="list-style-type: none"> Puulajina mänty Hiilinielu vaihtelee 0-7 tCO₂/a hehtaarilla tarkastelujakson aikana Männyn keskimääräinen vuotuinen kasvu 4 m³/ha Toimenpiteen elinkaari 45 v 	<p>Tässä laskennassa esimerkki puulajina on käytetty mäntyä, koska se on Suomen yleisin puulaji.</p> <p>Puulajin valintaan liittyy epävarmuuksia, koska puulajina voidaan käyttää männyn sijaan koivua, kuusta tai jotain muuta energiahyötykäyttöön soveltuvaa lajia.</p> <p>Männyn kasvukäyrä perustuu arvioon tuorekankaalle istutetusta männystä, minkä keskimääräinen vuotuinen kasvu on noin 4 m³/ha.</p>
Metsänhoito elinkaaren ajalta	<ul style="list-style-type: none"> Joka vuosi välillä 2019–2030 istutetaan taimia. 2030–2063 	Lähtötiedot mäntyjen kasvusta ja metsänhoidosta perustuvat Pöyryn arvioihin.

Aihe	Käytetyt lähtöoletukset	Epävarmuustekijät ja kommentit
	uusia istutuksia ei tehdä <ul style="list-style-type: none"> Istutus (sis. maanmuokkauksen) Mekaaninen heinäntorjunta suoritetaan kasvuvuosina 2-5 	Pellolle istutettavan metsän heinäntorjunta voitiin ottaa huomioon arvioimalla mekaanisen heinäntorjunnan vaikutusta. Istutus (sis. maanmuokkauksen) suoritetaan vain puun ensimmäisenä kasvuvuotena. Mekaaninen heinäntorjunta suoritetaan puun toisesta kasvuvuodesta vuosittain aina viidenteen kasvuvuoteen saakka.
Metsänhoidon kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> Istutus (sis. maanmuokkauksen) 1 132 EUR/ha Mekaaninen heinäntorjunta 380 EUR/ha 	Istutuksen ja mekaanisen heinäntorjunnan arvot perustuvat Luonnonvarakeskuksen tilastoihin. Tilaston arvot ovat vuodelta 2018. Mekaanisen heinäntorjunnan kustannus on oletettu vastaavan "taimikon varhaishoito, käsityönä" arvoa. Tässä taulukoidut arvot on otettu tilastosta yksityisille ym. ilmoitetuista kustannuksista.
Eloperäisten maiden metsityksen myötä menetetyt viljatulot	<ul style="list-style-type: none"> Metsityksen vuoksi heikkotuottoisen viljatulon menetys 176 EUR/ha/v (80 %) tai 110 EUR/ha/v (50 %/v) tai 55 EUR/ha/v (25 %) 	Metsityksen oletetaan tapahtuvan heikkotuottoisille peltoalueille. Voidaan olettaa, että heikkotuottoisilta viljapelloilta viljatulon menetys ei ole yhtä korkea kuin 220 EUR/ha/a. Viljatuoton menetyksestä aiheutuvia kustannuksia heikkotuottoisilla peltoalueilla tarkastellaan useilla eri osuuksilla. Arvioidaan heikkotuottoisen viljatulon menetyksen olevan joko 80 % 220 eurosta, 50 % 220 eurosta tai 25 % 220 eurosta.
Maanviljelijän perustuen menetys	<ul style="list-style-type: none"> 123 EUR/ha/a Tuotannosta riippumaton perustuki 	Tuotannosta riippumaton perustuki Etelä-Suomessa, AB-tukialue. Tuen määrä vuodelta 2019 (Maa- ja metsätalousministeriö, 2019). Tässä esimerkkilaskennassa on oletettu tuen määrän pysyvän vakiona. Tuen vaikutuksesta kustannustehokkuuteen on tehty erillinen herkkyystarkastelu.
Nykyarvo	<ul style="list-style-type: none"> Diskonttauskorko 3,5 % Diskonttauskorko 1,5 % 	Diskonttauskoroksi on valittu yleinen sosiaalinen diskonttauskorko 3,5 % toimenpiteen ensimmäiselle 20 vuodelle. Diskonttauskoroksi on valittu 1,5 % vuosille seuraaville 25 vuodelle. Taustaa diskonttauskoroista kappaleessa 6.1.6.

Maataloussektorin esimerkkilaskennan lähtötiedot ja laskentaoletukset on pyritty keräämään julkisista lähteistä tiedonsaatuuden mukaan. Taulukoista huomataan, että laskentaan liittyy muuttujia, joiden perusteella toimenpiteen laskennasta on mahdollista saada useita erilaisia variaatioita.

Toimenpiteen päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta on suoritettu vertaamalla perusuraa valittuun toimenpiteeseen. Tässä luvussa on esitetty laskenta pääpiirteittäin ja laskentaa on avattu enemmän liitteessä 5. Tarkastelussa on ensin suoritettu päästövähennyslaskenta ja sitten kustannuslaskenta. Lopuksi nämä on yhdistetty kustannustehokkuuslaskennassa. Päästövähennykset on laskettu seuraavalla kaavalla.

$$\text{Päästövähennys}_{EK45} = PEV_{perusura} - PEV_{toimenpide} + HN_{puut}$$

Missä:

- Päästövähennys_{EK45} = Päästövähennyksen suuruus, kun toimenpiteen elinkaari on 45 vuotta.
- PEV_{perusura} = Päästöt eloperäisen maan viljelystä (PEV) Kasvihuonekaasupäästöt eloperäisten maiden viljelystä. Kumulatiivinen arvo, 45 vuotta.
- PEV_{toimenpide} = Kasvihuonekaasupäästöt eloperäisten maiden viljelystä (heikko-tuottoiset) eloperäisten maiden metsitys toimenpiteessä. Kumulatiivinen arvo, 45 vuotta.
- HN_{puut} = Hiilinielut istutetuista puista. Kumulatiivinen arvo 45v.

Kustannusten laskennassa lasketaan toimenpiteelle määritetyn elinkaaren aikaiset kustannukset (45 v) diskontattuna 3,5 %:n (ensimmäiset 20 vuotta) ja 1,5 %:n diskonttauskorolla (seuraavat 25 vuotta) seuraavasti:

$$NPV (Kustannukset_{3,5\%}) = \sum_{t=1}^{20} \frac{MHK_t}{(1 + 0,035)^t} + \sum_{t=25}^{20} \frac{VMK_t}{(1 + 0,035)^t}$$

$$NPV (Kustannukset_{1,5\%}) = \sum_{t=1}^{25} \frac{MHK_t}{(1 + 0,015)^t} + \sum_{t=1}^{25} \frac{VMK_t}{(1 + 0,015)^t}$$

$$\text{Kokonaiskustannukset}_{EK45} = NPV (Kustannukset_{3,5\%}) + NPV (Kustannukset_{1,5\%})$$

Missä:

- Kustannukset_{3,5%} = Toimenpiteen ensimmäisen 20 vuoden kustannukset diskontattuna nykyarvoksi 3,5 % diskonttauskorolla
- Kustannukset_{1,5%} = Toimenpiteen ensimmäisen 20 vuoden kustannukset diskontattuna nykyarvoksi 3,5 % diskonttauskorolla
- MHK= Metsänhoidon kustannus (MHK) kuluvana vuonna
- VMK= Viljelijän menetetty kustannus (VMK). Viljatulon menetyksen kustannus kuluvana vuonna. Kustannus tässä esimerkissä 176 EUR/ha/a (80 %)
- Kokonaiskustannukset_{EK45} = Kokonaiskustannukset toimenpiteelle määritetyn elinkaaren (45 v) ajalta

Eloperäisten viljapeltojen metsitys -toimenpiteen kustannustehokkuus saadaan seuraavasti:

$$\text{Kustannustehokkuus} = \frac{\text{Kokonaiskustannukset}_{EK45}}{\text{Päästövähennys}_{EK45}}$$

Tässä esimerkkilaskennan laskentakaavassa on katsottu tilannetta (skenaario 1), jossa viljatulo heikkotuottoisilla vilja-ajoilla olisi 176 EUR/ha/a (80 %). Herkkyystarkastelu erilaisilla hintavariaatioilla on esitetty esimerkkilaskennan jälkeen. Ensiksi esitetään päästövähennysten laskeminen tarkasteltavan elinkaaren ajalle.

$$\begin{aligned} \text{Päästövähennys}_{EK45} &= 9\,120\,257 \text{ tCO}_2\text{e} - 7\,681\,849 \text{ tCO}_2\text{e} + 2\,214\,481 \text{ tCO}_2\text{e} \\ \text{Päästövähennys}_{EK45} &= 3\,652\,889 \text{ tCO}_2\text{e} \\ \text{Kustannukset}_{EK45} &= 111\,016\,544 \text{ €} \\ \text{Kustannustehokkuus} &= 30,4 \text{ € / t CO}_2\text{e} \end{aligned}$$

Kustannustehokkuuslaskennalle tehtiin herkkyystarkastelu, jossa muuttujana oli eloperäisen heikkotuottoisen viljapellon viljasta saatava viljatulo. Viljatulon oletettiin olevan pienempi kuin 220 EUR/ha/a, joten seuraavia hintaskenaarioita tarkasteltiin:

- Skenaario 0: Perusuran mukainen viljatulo 220 EUR/ha/a (100 %:a perusuran viljatuotosta)
- Skenaario 1: viljatulo 176 EUR/ha/a (80 %:a perusuran viljatuotosta)
- Skenaario 2: viljatulo 110 EUR/ha/a (50 %:a perusuran viljatuotosta)
- Skenaario 3: viljatulo 55 EUR/ha/a (25 %:a perusuran viljatuotosta)

Taulukko 7-15 Eri skenaarioiden päästövähennysten kustannustehokkuuslaskennan vertailu

Aihe	Skenaario 0 (100 %)	Skenaario 1 (80 %)	Skenaario 2 (50 %)	Skenaario 3 (25 %)
Kustannustehokkuus EUR/tCO ₂ e.	35,6	30,4	22,6	16,2

Kuten edellä olevasta taulukosta nähdään, yhden oletusarvon muuttamisella on jo huomattavia vaikutuksia. Lisäksi tarkasteltiin maanviljelijän perustuen menettämisen vaikutusta toimenpiteen kustannustehokkuuteen. Laskennassa käytettiin tuotannosta riippumatonta perustukea AB-tukialueella Etelä-Suomessa. AB-tukialueella tuen määrä on suurin, minkä vuoksi se valittiin tähän tarkasteluun. Oletettiin, että kaikki peltoala on tukikelpoista aktiivisesti viljeltyä peltoa. Perustuen määrä AB-tukialueella (123 EUR/ha/a) on vuodelle 2019 ja sen on oletettu pysyvän vakiona tarkasteluajanjakson ylitse. Kustannustehokkuus on laskettu samalla periaatteella, kuten aiemmin on kuvattu. Ainoa muuttuva termi on kustannuskaavassa VMK (Viljelijän menetetty

kustannus), johon on lisätty vuosittain menetetty perustuen määrä kerrottuna vastaavan vuoden menetetyllä viljapinta-alalla. Perustuen menetyksen kustannukset on huomioitu määritetyn elinkaaren ajalta (45 v) ja diskontattu, kuten aiemmin kuvattu.

$$\begin{aligned} \text{Päästövähennys}_{EK45} &= 3\,652\,889 \text{ tCO}_2\text{e} \\ \text{Kustannukset}_{EK45} &= 163\,749\,590 \text{ €} \\ \text{Kustannustehokkuus} &= \mathbf{44,8 \text{ € /t CO}_2\text{e}} \end{aligned}$$

Maataloustuen huomioiminen toimenpiteestä aiheutuviin kustannuksiin heikentää toimenpiteen kustannustehokkuutta merkittävästi. Skenaarion 1 mukaisessa tarkastelussa toimenpiteen kustannustehokkuus nousee 30,4 EUR/tCO₂e jopa 44,8 EUR/tCO₂e. Tätäkin muuttujaa voisi vielä tarkastella mallintamalla perustuelle aikaperusteista kustannuksen muutosta.

Tämän esimerkkilaskennan tarkoituksena on havainnollistaa valittua laskentametodia, laskennanrajausta, valittavien lähtötietojen vaikutusta sekä oletusten epävarmuutta. Maataloussektorille kohdistuvat toimenpiteet sisältävät usein ristikkäisvaikutuksia muille raportointisektoreille, kuten LULUCF-sektorille. Edellä kuvattu toimenpide sisältää myös päästövähennyksiä, jotka kohdistuvat sekä maatalous- että LULUCF-sektorille. Näiden määrät on raportoitu erikseen liitteessä 5.

Esimerkkilaskennan perusteella voidaan huomata se, että valittavia muuttujia on paljon ja oletusten kirjo on laaja. Päästövähennykseen vaikuttavia muuttujia ovat muun muassa puulajin valinta, tarkasteltavan elinkaaren pituus, metsästä saatavan puumateriaalin loppukäytön ilmastohyödyt tai -haitat ja heikkotuottoisen eloperäisen maan vapauttama hiilen määrä. Istutettavan puulajin valinta ja alueen maaperä vaikuttavat merkittävästi puun kasvuun ja sen vuoksi myös suoraan hiilinielun suuruuteen. Alueen maaperä vaikuttaa myös siihen, kuinka paljon heinikkoa tai muuta epätoivottua kasvillisuutta istutusalueella esiintyy ja kuinka paljon sitä täytyy olla raivaamassa metsän kasvun tieltä. Mikäli metsää halutaan hakata, niin harvennus- ja päätehakuut vaikuttavat sekä metsän hiilinielun suuruuteen että maaperän sisältämään hiilen määrään. Metsästä saatavan puumateriaalin loppukäytöllä on ristikkäisiä vaikutuksia esimerkiksi energiasektorille, jos metsän hakkuutähteitä käytetään polttolaitoksissa. Lisäksi tarkasteluun voidaan ottaa mukaan maatalous- ja metsänhoitokoneiden vaatiman fossiilisen polttoaineenkulutuksen kasvihuonekaasupäästöt.

Kustannukset voivat vaihdella esimerkiksi valitun viljatulon hinnan perusteella, metsänhoitoon liittyvien kustannusten ja maataloustuen menetyksen kautta. Jos metsästä saatavan puumateriaalin loppukäyttö otetaan mukaan laskentaan, puutavaran arvon vaihtelut lisäävät myös variaatioita laskentaan. Kustannuksiin ja päästövähennyksiin vaikuttaa myös olennaisesti se, onnistuuko suunniteltu peltoistutus vai ei. Turvemaiden metsittäminen voi epäonnistua tuhojen takia. Näin ollen metsitys joudutaan usein

uusimaan ainakin osittain. Mikäli metsitys epäonnistuu, kannattaa harkita puulajin tai kasvatustekniikan vaihtoa. Nämä tekijät luovat lisää epävarmuutta metsitystoimenpiteen kustannustehokkuuteen.

Kuten yllä oleva esimerkki havainnollistaa, maatalouteen liittyvien toimenpiteiden haasteena on se, että päästövähennystoimien kustannustehokkuuteen vaikuttaa oleellisesti biologiset prosessit, joita on haastava arvioida pitkällä aikavälillä. Toimenpiteiden aiheuttamat ristikkäisvaikutukset energiasektorille on myös huomioitava esimerkiksi biokaasun tuottoa lisäävissä toimenpiteissä sekä puun energiakäytössä. Lisäksi toimenpiteen vaikutuksesta riippuen, siinä voi esiintyä erilaisia epäsuoria vaikutuksia. Tässä esimerkissä, jos laajoja peltoaloja metsitetään, sillä voi olla vaikutusta viljantuotantoon. Tämä puolestaan voi vaikuttaa joko viljan hintaan, tuontimääriin tai muiden peltoalojen käyttöön. Tämän kaltaisten vaikutusten arviointi vaatii top-down lähestymistapaa.

8 Johtopäätökset

8.1 Päästövähennystoimien kustannustehokkuuslaskennan analysointi

Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta ja analysointi on hyvin poikkitieteellinen kokonaisuus. Siinä vaaditaan kansantaloudellisten periaatteiden ymmärtämistä, mallinnusosaamista ja systeemajattelua sekä hyvin yksityiskohtaista ymmärrystä eri sektorien lainalaisuuksista. Joissain tapauksissa vaaditaan myös ymmärrystä biologisista prosesseista. Tämä tekee kokonaisuudesta monitahoisen ja monimutkaisen.

Päästövähennysten kustannustehokkuuslaskentaan liittyy useita elementtejä, kuten perusrakentaminen, skenaarioiden valinta, mallinnusmenetelmät, kustannustarkastelun valinta ja tulosten esitystapa. Mallinnusmenetelmän valinta ohjaa vahvasti muita elementtejä. Itse mallinnusmenetelmät voidaan jakaa bottom-up- ja top-down-lähestymismalleihin. Bottom-up-lähestymistavat ovat joko yksittäistarkastelua tai osittaistasapainomalleja. Yksittäistarkastelussa tarkastellaan tyypillisesti yhtä tai muutamaa toimenpidettä, joita analysoidaan staattisen laskennan menetelmin. Osittaistasapainomallit taas ovat luonteeltaan dynaamisia, eli laskenta ottaa huomioon eri ajanjaksoilla tapahtuvat muutokset ja ne laskevat kustannusoptimia teknologia- tai toimenpidepakettia.

Mallinnusmenetelmät ottavat huomioon erilaisia ristikkäis- ja epäsuoria vaikutuksia eri tavoin. Yksittäistarkastelussa niitä ei oteta huomioon suoraan, vaan erilaiset vaikutusmekanismit täytyy ottaa huomioon laskennan syötteissä. Osittaistasapainomalleissa jotkut ristikkäiset vaikutukset tulevat huomioitua mallinnuksen sisällä. Osittaistasapainomallit ovat tyypillisesti (tilanteesta ja sektorista riippuen) tarkempia kuin yksittäistarkastelulla tehdyt laskennat, mutta ne ovat ajankäytöllisesti ja laskennallisesti huomattavasti raskaampia. Top-down-malleilla voidaan arvioida laajemmin eri toimenpiteiden vaikutuksia, kuten esim. kansantaloudellisia vaikutuksia. Tämän kaltaisia mallinnusmenetelmiä on kaksi: panos-tuotosmenetelmät ja yleiset tasapainomallit (YTP).

Yleisesti ottaen ei ole yhtä täysin oikeaa menetelmää arvioida päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuutta ja eri menetelmissä on omat etunsa ja rajoitteensa. Eri mallinnuslähestymistavoilla tarkastellaan ongelmaa eri näkökulmista ja niillä voidaan vastata eri kysymyksiin. Erillislaskennalla on vaikea arvioida kokonaisuuden kannalta kustannustehokkainta päästövähennyspolkua, koska sen avulla on

haasteellista huomioida kaikkia epäsuoria vaikutuksia eikä se siten sovellu hyvin ilmastotavoitteiden asettamiseen. Erillislaskennalla voidaan kuitenkin tarkastella yksittäisiä toimenpiteitä suhteellisen tarkasti ja vastata kysymykseen ”kuinka paljon ja kelle aiheutuu suoria kustannuksia, mikäli toteutetaan valittu ohjauskeino valitulla tavalla”. Vastaavasti osittaistasapainomallinuksilla voidaan paremmin vastata kysymykseen ”mikä on järkevä toteutuspolku eri toimenpiteille” ja YTP-malleilla kysymykseen ”mikä on kokonaisvaikutus”.

Hyväksi havaittu menetelmä on ns. integroidut lähestymistavat, joissa yhdistellään sekä bottom-up- että top-down-menetelmiä. Tällöin esimerkiksi lasketaan ensin sektori-kohtaisesti bottom-up-menetelmällä toimenpiteiden kustannustehokkuus tai kustannustehokkaat skenaariot, jonka jälkeen arvioidaan niiden vaikutuksia kansantalouteen top-down-malleilla. Tämänkaltaiset lähestymistavat ovat tosin raskaita sekä mallin-
nusmielessä että resurssien puolesta. Laskenta ja raportointi ovat laajoja, mahdollisesti kuukausia kestäviä projekteja ja niitä onkin tehty kaikissa tarkastelluissa maissa vain kourallinen muutaman edellisen vuoden aikana. Näin ollen niiden laajamittainen käyttö ei ole välttämättä realistista. Yksittäistarkastelut vastaavasti voivat olla hyvin kevyitä mallinusharjoituksia.

Eri sektoreiden päästövähennystoimien kustannustehokkuuden laskentatavat voivat olla hyvin erilaisia ja erilaiset käytännöt soveltua eri aloille. Maataloussektorilla esimerkiksi käytetään yksinomaan yksittäistarkastelua analyysimenetelmänä, mikä johtuu siitä, että päästölaskenta on maataloussektorilla erittäin monimutkaista. Päästöt ja päästövähennykset johtuvat biologisista prosesseista ja maantieteellisistä olosuhteista. Lisäksi erilaisia tilanteita on lukuisia eikä tietopohja ole samalla tasolla kuin monilla muilla sektoreilla. Yksittäistarkastelun lisäksi maataloussektorilla ei juurikaan tehdä top-down- tai kansantaloudellisten vaikutusten analysointia.

Liikennesektorilla hyväksi havaittu tapa on tehdä bottom-up-mallinnus osittaistasapainomallilla ja kansantaloudellisten vaikutusten arviointi erikseen YTP-malleilla, joilla mallinnetaan koko toimenpidepaketin vaikutukset – ei pelkät liikennesektorin vaikutukset. YTP-vaikutusten arviointi on tärkeä osa kokonaisuutta, sillä etenkin liikennesektorilla on huomattava määrä epäsuoria ja kansantaloudellisia vaikutuksia. Eri lähestymistavat aiheuttavat sen, etteivät esimerkiksi maatalous- ja liikennesektorin toimien analyysit ole keskenään vertailukelpoisia.

Työssä havaittiin, että tyypilliset kustannustehokkuusanalyysit ja laskennat eivät usein tähtää ohjauskeinojen suunnitteluun, vaan niillä arvioidaan toimenpiteiden tai teknologioiden vaikutusta. Näissä tapauksissa voidaan esimerkiksi analysoida, mikä on päästöjen kannalta kustannustehokkain ajoneuvoportfolio, mutta harvoin analysoidaan, kuinka hyvin esimerkiksi investointituki edesauttaa päästövähennystavoitteisiin pääsyä.

Toinen selkeä havainto on suhteellinen avoimuuden puute kustannustehokkuuslaskennassa, etenkin Suomessa tehdyissä selvityksissä. Laskennassa täytyy tehdä huomattavia määriä erilaisia oletuksia, mutta tyypillisesti näitä oletuksia avataan hyvin puutteellisesti, mikä sekä vaikeuttaa eri laskentojen lopputulosten vertailua että mahdollista jatkokehittämistä. Mm. lähtötietoja ja niiden sisältöä perustellaan usein vähäisesti, teknologiakehityksen oletuksia ei avata ja laskentarajauksien ja mallinnusmenetelmien kuvaus on puutteellista.

8.2 Hyviä käytäntöjä muista maista

Tämän selvityksen keskiössä on ollut kustannustehokkuuden laskentamenetelmät, joita on tarkasteltu selvittämällä, miten laskentaa on tehty Suomen lisäksi kolmessa maassa: Saksassa, Isossa-Britanniassa ja Ruotsissa. Osana selvitystä on noussut esille myös muita käytäntöjä näistä maista, jotka eivät suoraan liity kustannustehokkuuslaskennan metodologiaan, vaan yleisiin periaatteisiin analyysien ympärillä. Näitä ovat esimerkiksi miten ilmastopolitiikkaa on toteutettu, kuka tilaa selvityksiä, kuka tekee kustannustehokkuus selvityksiä ja mitä periaatteita selvitysten tekemiseen liittyy. Eri maiden välillä on tässä suhteessa huomattavan paljon erilaisia käytäntöjä, joista tässä tuodaan esiin muutamia toimivaksi havaittuja käytäntöjä.

Iso-Britannia

Isossa-Britanniassa on yksi pääasiallinen taho, joka selvittää valtion politiikkatoimien päästövähennyksiä ja niiden kustannustehokkuutta: CCC (Comittee on Climate Change) on itsenäinen organisaatio, joka perustettiin ilmastonmuutoslain voimaantulon yhteydessä vuonna 2008. Organisaation tehtävänä on tuottaa tietoa ja tukea hallitusta sekä ministeriöitä ilmastonmuutoksen hillitsemisessä ja politiikan kehittämisessä.

Ison-Britannian ilmastopolitiikka rakentuu hiilibudjettien ympärillä (Carbon budget). Hiilibudjetit ovat viiden vuoden mittaisia ajanjaksoja, joille määritetään päästöjen ja päästövähennysten tavoitetaso. Tällä hetkellä on käynnissä kolmannen hiilibudjetin periodi (2018–2022) ja viimeisin viides hiilibudjetti vuosille 2028–2032 määritettiin vuonna 2016. CCC tekee taustaselvityksiä sekä hiilibudjettien määrittämistä varten että julkaisee vuosittaisia arvioita päästövähennysten realisoitumisesta ja voimassa olevan hiilibudjetin tavoitetason saavuttamisesta. Omia analyysejä ja selvityksiä varten CCC teettää huomattavan määrän taustaselvityksiä eri tutkimusyksiköillä ja konsulttitoimistoilla.

CCC:llä on monitahoinen vastuu: se tekee selvityksiä ilmastopoliittisia tavoitteita varten, tilaa erilaisia taustaselvityksiä mm. eri toimenpiteiden ja teknologioiden kustannuksista, sekä arvioi tasaisin väliajoin ilmastotavoitteiden etenemistä. Suomen tilanteeseen suhteutettuna suurimmat erot ovat juurikin jatkuva seuranta sekä selkeän ja keskitetyn roolin mahdollistama jatkuva menetelmien kehitys. CCC:n toteuttamat analyysit rakentuvat edellisten päälle ja heidän tilaamansa taustaselvitykset ovat osa menetelmien ja tietopohjan kartuttamisen jatkumoa.

Ruotsi

Ruotsin pitkän aikavälin ilmastostrategiassa pyritään kasvihuonekaasupäästöjen osalta saavuttamaan nollapäästöt vuoteen 2045 mennessä ja siitä eteenpäin tuottamaan vain negatiivisia päästöjä (Naturvårdsverket, 2017). Tärkeimmät yleiset poliittiset toimet tai ohjauskeinot ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi ovat EU:n päästökaupan lisäksi energia- ja hiilidioksidivero, ympäristölaki (Miljöbalken) ja viimeisimpänä ilmastoharppaus (Klimatklivet).

Ruotsissa ilmastopoliittikka on huomattavasti keskittyneempi yhteen sektoriin, liikenteeseen, johtuen sen suuresta osuudesta kokonaispäästöissä. Täten sekä ilmastopoliittiset ohjauskeinot että kustannustehokkuusarviointi ovat huomattavasti keskittyneet liikennesektoriin.

Suhteessa Suomeen Ruotsissa mielenkiintoinen käytäntö on systemaattinen ex-post-arviointi ex-ante-arvioiden lisäksi. Tämä tarkoittaa sitä, että toimenpiteiden kustannuksia ja kustannustehokkuutta on arvioitu sekä ennen poliittisten tavoitteiden ja ohjauskeinojen asettamista että niiden jälkeen (Mm. WSP 2017 sekä RIR 2019)). Tällä tavalla tuotetaan jatkuvasti tietoa toimenpiteiden ja ohjauskeinojen onnistumisesta, mitä voidaan hyödyntää uusien politiikkatoimien suunnittelussa.

Saksa

Vuoteen 2050 tähtäävässä ilmastostrategiassaan Saksan tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80–95 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon. Maan tavoitteena on myös olla pitkälti hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Ilmastostrategiassa on asetettu välietappeja ja strategisia toimenpiteitä eri sektoreille (energiatalous, teollisuus, rakennukset, liikenne, maatalous) näihin tavoitteisiin liittyen. (BMU 2016)

Hallituksen lisäksi myös Saksan osavaltiot, kunnat ja keskeiset järjestöt ovat osallistuneet uusimman ilmastostrategian työstämiseen ja kaikki tahot ovat saaneet esittää ja

kehittää strategisia toimenpiteitä, joista hallitus valitsi 97 toimenpidettä alustaviksi ehdotuksiksi strategiaan. Liittovaltio pyrkii myös näyttämään hyvää mallia osavaltioille ja kunnille päästövähennysasioiden ympärillä eli johtamaan omalla esimerkillään. (Öko-Institut e.V. et al 2019)

Saksassa on onnistuttu melko hyvin laskennan lähtötietojen avaamisessa, ja aiheeseen liittyviä julkaisuja ja laskelmia on historiassa tehty eri instituutioiden toimesta. Historiasta on myös havaittavissa, että Saksassa tehdyt raportit ovat monesti usean eri organisaation yhteistyön tulos. Tämän voi nähdä lisäävän lopputulosten luotettavuutta. Myös tiedon jakaminen eteenpäin on ulkopuolisen silmin tarkasteltuna onnistunut hyvin, sillä PwC:n työstämä raportti, johon on viitattu tässäkin työssä, on ollut jatkoa Öko-Institutin ja muiden organisaatioiden valmistelemasta aiemmasta laskelmasta. PwC on kehittänyt laskelmia eteenpäin ja avannut laskentaoletuksia entistä paremmin. PwC:n tekemä raportti on myös hyvin avoin laskentaoletusten ja menetelmien suhteen, joskin valittu laskentamenetelmä (yksittäistarkastelu) mahdollistaa tämän helpommin kuin jotkin muut laskentamenetelmät.

8.3 Kehityskohteet

Suomen tulisi systematisoida päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi tarvittavien päästövähennystoimien ja ohjauskeinojen analysointia ja suunnittelua sekä seurata toimilla saavutettuja hyötyjä sekä toimien kustannustehokkuutta. Jatkuva seuranta mahdollistaa tarvittavien korjausliikkeiden toteuttamisen ajoissa. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa on kehitetty pitkäjänteinen kausittaisiin hiilibudjetteihin perustuva järjestelmä, jollainen voisi edesauttaa myös Suomen hiilineutraaliustavoitteen saavuttamisessa. Myös Ruotsissa systemaattisesta ohjauskeinojen ex-ante- ja es-post-arvioinnista voisimme ottaa Suomessa mallia.

Päästövähennysten kustannustehokkuusanalyysien ja laskentojen tulisi olla nykyistä huomattavasti avoimempia, sekä käytettyjen laskentamenetelmien että taustaoletusten osalta. Suurempi avoimuus mahdollistaa sekä paremman vertailun eri tahojen selvitysten toimenpiteiden välillä (vrt. esim. VTT:n Koljonen ym. 2017 ja Mckinseyn, Granskog ym. 2018, tekemien selvitysten ero sähköautojen kustannustehokkuudessa) että paremman ymmärryksen yksittäisten selvitysten lopputuloksista ja siitä, miten eri tekijät saattavat vaikuttaa kustannustehokkuusarvioon. Avoimuus mahdollistaa laajemman keskustelun ja analyysimenetelmien kehittämisen edellisten selvitysten pohjalta.

Esim. Söderholm (2012) teki metodologia-analyysin eri päästövähennysten kustannusten arviointimenetelmistä ja tulosten epävarmuuksista. Hän tunnisti selvityksessä seuraavia syitä eri mallinnusmenetelmien tuottamille toisistaan poikkeaville kustannusarvioille:

1. erot perusurassa (mm. teknologian kehitys, hinnat ja muodostamismenetelmä),
2. käytettyjen mallinnusmenetelmien rakenteelliset erot (mm. teknologiasubstituutio, teknologisten yksityiskohtien mallinnus),
3. teknologisen kehityksen mallinnus (onko teknologian kehitys eksogeeninen vai endogeeninen muuttuja),
4. toimenpiteen tai ohjaukskeinon mekanismit ja niiden mallinnus ja
5. markkinoiden ulkopuolisten kustannusten ja hyötyjen mallinnus sekä muiden kasvihuonekaasujen mallinnus.

Lista havainnollistaa hyvin syitä eri selvitysten poikkeaviin johtopäätöksiin ja samalla antaa osviittaa, mitä asioita analyysissä olisi hyvä avata tarkemmin, jotta tuloksien pätevyyttä voisi pohtia.

Selvityksen perusteella todettiin myös tarve yhtenäisemmille käytännöille ja käsitteille. Yhtenäisiä käytäntöjä tarvitaan esimerkiksi raportoinnin suhteen, tulosten esittämiskäytäntöjen suhteen ja sen varmistamiseksi, että EUR/tCO₂ kustannus on laskettu eri laskelmissa samalla tavalla. Yhtenäisemmät käsitteet auttavat raportointikäytäntöjen yhtenäistämistä ja edistävät avoimuutta. Periaatteessa myös Ison-Britannian tyylinen yleinen laskentaohje voi olla toimiva vaihtoehto (tarkempi kuvaus tästä löytyy osiosta 6.2.)

Raportoinnin ja tulosten avoimuus tulee olla sekä selvitysten tilaajan, eli pääsääntöisesti ministeriöiden, että toteuttajien vastuulla. Tämä on tärkeää, etenkin jos tavoitteena on kustannustehokkuusanalyysien kehittäminen ja laajentaminen. Ministeriöt voivat esim. pyrkiä kehittämään ja julkaisemaan yleispäteviä perusuria, joita voidaan käyttää tilattavien töiden vertailukohtana (ylipäätään hyvä periaate on, että ministeriöiden tilaamien selvitysten ja niissä käytettävien lähtöoletusten tulisi olla mahdollisimman avoimia).

Mahdollinen kehityskohde on lisätä englannin kielen käyttöä kustannustehokkuusanalyysien raportoinnissa. Tällä on kaksi konkreettista hyötyä ja perustelua: 1) englannin kielen käyttö mahdollistaa paremman käytäntöjen leviämisen ja vertailun eri maiden välillä. Yhteinen kieli mahdollistaa omien käytäntöjen viestimisen ja voi edesauttaa keskustelua muissa maissa arvioiteja tekevien tahojen kanssa. Lisäksi vaikka ilmastomuutoksen torjuntaa tehdään tyypillisesti kansallisella tasolla (ja siksi raportit myös tyypillisesti tehdään paikallisella kielellä), niin ilmastomuutos on globaali ongelma ja päästöjen vähentämisen käytäntöjen jakaminen on tarpeen. Toisena syynä 2) Suo-

men energiapolitiikka on kansainvälisesti vertailtuna hyvin kunnianhimoinen. Englannin kielen laajempi käyttö Suomessa tehdyissä selvityksissä edesauttaa sen esille tuomista ja maakuvan luomista.

Voi olla myös tarvetta kasvattaa yhteistyötä sekä ministeriöiden välillä että kustannus-tehokkuuslaskelmia tekevien toimijoiden välillä. Analyysien monimutkaisuus ja poikkitieteellisyys edellyttää useita eri näkökulmia, joiden esille tuominen onnistuu yhteistyötä kehittämällä. Yhteistyö ministeriöiden välillä voi tarkoittaa enemmän yhteistyössä tehtyjä ja ohjattuja selvityksiä sekä selkeämpää vastuunjakoa toiminnan kehittämisessä. Näin varmistetaan, että tehdyt ja tilatut raportit tulevat paremmin osaksi kokonaisuutta, jossa sekä tuotetaan tietoa päätöksenteon tueksi että kehitetään työkaluja ja lähestymistapoja jatkuvan parantamisen hengessä. Yhteistyötä voi kasvattaa myös eri analyyseja tekevien tahojen välillä, niin että selvityksiä ei välttämättä tilata vain yhdeltä toimijalta, vaan selvityksiä ja kehittämistä voi olla tekemässä useampi toimija ja ne voisivat käyttää lähtökohtana muiden tahojen aiemmin tekemiä selvityksiä.

Liite 1: Yhteenvedot työpajoista

Maatalous

Tausta

Työpaja järjestettiin tiistaina 11.6.2019 työ- ja elinkeinoministeriön tiloissa osoitteessa Aleksanterinkatu 4-10. Työpajan tarkoituksena oli käsitellä KAISUn maatalouteen liittyvien lisätoimien päästövähennysten kustannustehokkuuden arviointia ja mittamista. Työpajaan osallistuivat VN TEAS -projektin ohjausryhmän jäsenten lisäksi henkilöitä seuraavilta tahoilta: Ympäristöministeriö, Maa- ja metsätalousministeriö, Luonnonvarakeskus, Biocode ja yksi maatalousalan yrittäjä. Pöyry fasilitoi työpajan ja siihen osallistuivat myös Pöyryn alikonsultit.

Työpaja

Työpajassa käsiteltiin keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmassa (KAISU) tunnistettuja toimenpiteitä, erityisesti eloperäisten maiden metsitystä, biokaasun tuotannon lisäämistä sekä eloperäisten maiden viljelyä monivuotisesti muokkaamatta. Työpajan tavoitteena oli pohtia tekeillä olevan selvityksen laskentatavan vahvuuksia, heikkouksia ja epävarmuustekijöitä sekä selkeyttää laskentametodeja ja -oletuksia. Työpajan tarkoituksena oli myös keskustella muiden maiden esimerkeistä ja niiden hyödynnettävyydestä sekä luoda ymmärrystä riippuvuussuhteista ja niiden vaikutuksesta laskentaan. Yksittäisien toimien osalta keskusteltiin myös laskentaoletuksista ja laskentarajauksista. Henkilöt jaettiin kahteen ryhmään, joista Ryhmä A käsiteli yksittäisiä päästövähennystoimia perustason, päästölaskennan rajauksen, tarkasteltavan laskentayksikön, laskennassa huomioitavan aikajänteen sekä kustannustarkastelun rajausten osalta. Ryhmässä B keskityttiin KAISUssa määritellyjen lisätoimenpiteiden vuorovaikutuksiin.

Tärkeimmät havainnot

Ryhmän A mukaan laskentamenetelmän tulee hyödyntää sekä kansallisella että kauppeammalla tasolla raportoituja tilastoja. Työpajassa käsiteltiin tarkemmin kolmea lisätoimenpidettä: eloperäisten maiden viljelyä monivuotisesti muokkaamatta, eloperäisten maiden metsitystä ja biokaasun tuotannon edistämistä. Ryhmän mukaan biokaasuntuotannon edistämistä on jatkettava ja pyrittävä tehostamaan sekä mainittiin, että käytetyn toimenpiteen ”monivuotiset ympäristönurmet turve- tai multamaalla” toteutusta jatketaan ja pyritään tehostamaan. Lisäksi päästölaskennan rajauksissa keskityttiin vain suoriin päästölähteisiin ja hiilinieluihin. Laskennan ajanjaksosta ilmeni

useita mielipiteitä. Kustannusten osalta suoria ja kansantaloudellisia kustannuksia pidettiin olennaisina.

Ryhmässä B keskityttiin ennen kaikkea erilaisten ristikkäisvaikutusten tunnistamiseen maataloussektorilla. Ryhmä nosti esille, että MAC-käyrä-tyyppisiin esitystapoihin ja vastaaviin vertailuihin sisältyy huomattava määrä epävarmuutta. Merkittäviä sektorien välisiä ristikkäisvaikutuksia ei tunnistettu, vaan päästöjen ja kustannusten muodostumiseen vaikuttavien tekijöiden todettiin tapahtuvan maataloussektorin sisäpuolella.

Työpajassa lisäksi todettiin, että kaikkien maataloussektorin toimenpiteiden toteutusta ei voida ajatella, mutta on lähdeittävä liikkeelle siitä, mitkä yksittäin tarkasteltuna ovat edullisimpia päästövähennysten saavuttamiseksi. Esille tuli myös, että arvioitujen päästövähennysten tulisi korreloida Suomen kasvihuonekaasupäästöinventaarion kanssa.

Rakennusten erillislämmitys

Tausta

Työpaja järjestettiin maanantaina 17.6.2019 Maa- ja metsätalousministeriön tiloissa osoitteessa Mariankatu 9. Työpajan tarkoituksena oli käsitellä KAISUn rakennusten erillislämmitykseen liittyvien lisätoimien päästövähennysten kustannustehokkuuden arviointia ja mittaamista. Työpajaan osallistuivat VN TEAS -projektin ohjausryhmän jäsenten lisäksi henkilöitä seuraavilta tahoilta: Aalto-yliopisto, Suomen Ympäristökeskus, Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiavirasto, Ympäristökeskus ja Motiva. Pöyry toimi työpajassa fasilitaattorina.

Työpaja

Työpaja keskittyi rakennusten erillislämmityssektoriin liittyvien KAISUssa tunnistettujen lisätoimenpiteiden käsittelyyn. Työpajan tavoitteena oli pohtia päästövähennysten kustannustehokkuuslaskennan vahvuuksia, heikkouksia ja epävarmuustekijöitä sekä selkeyttää laskentametojeja ja -oletuksia. Työpajan tarkoituksena oli myös keskustella muiden maiden esimerkeistä ja niiden hyödynnettävyydestä sekä luoda ymmärrystä toimien ja toimenpiteiden riippuvuussuhteista ja niiden vaikutuksesta laskentaan. Ryhmä A käsiteli yksittäisiä toimenpiteitä kustannuskomponenttien, vaihtoehtoiskustannuksen muodostamisen, laskentaperiaatteiden ja -oletusten sekä aikarajauksen kannalta. Ryhmässä B käsiteltiin eri lähestymistapoja kustannustehokkuuden laskemiselle ja tunnistettiin eri menetelmien hyötyjä, haittoja ja niihin liittyviä epävarmuuksia.

Tärkeimmät havainnot

Ryhmässä A todettiin, että tilastojen ja datan saatavuudesta riippuen, laskennassa on todennäköisesti tehtävä erilaisia skenaarioita ja testauksia. Ryhmässä mainittiin, että kustannustehokkuuslaskennassa tulisi ottaa myös muita vaihtoehtoisia lämmitysmuotoja maalämpöpumppujen ohelle. Työpajan osallistujat kannattivat ”teknologiamixin” huomioimista laskennassa. Lisäksi he nostivat esiin, että laskentaa olisi hyvä tehdä rakennustyypeittäin. Toinen keskeinen aihe laskentameteodeista puhuttaessa liittyi laskennan ajanjaksoon. Huolimatta elinkaaren määrittelyyn ja laskentaan liittyvistä epävarmuuksista, olisi se paras tapa lähestyä aihetta. Työpajassa nousi esiin, että toimenpiteet ja niiden vaikutukset ovat järkevintä laskea yhdessä ja käyttää samoja oletuksia eri toimenpiteiden osalta. Vaihtoehtoisteknologioita tarkastellessa olisi hyvä ottaa huomioon mahdolliset hallitusohjelman tai muiden tahojen regulaatiot ja suositukset esimerkiksi lämpöpumppujärjestelmiin liittyen.

Ryhmässä B keskusteltiin aluksi eri lähestymistavoista päästövähennysten kustannustehokkuuden laskemiselle. Ryhmässä todettiin, että eri menetelmät soveltuvat eri käyttökohteisiin, eikä selkeästi yhtä ’oikeaa’ menetelmää ole. Molemmissa työpajoissa nousi hyvin vahvasti esiin se, että KAISUssa määritellyt rakennusten erillislämmityssektorin lisätoimenpiteet ovat voimakkaasti sidoksissa sosiaalipolitiikkaan. Sosiaalipolitiikan vaikutukset näkyvät esimerkiksi maksukyvyssä ja myönnettyissä tuissa.

Liikenne

Tausta

Työpaja järjestettiin keskiviikkona 21.8.2019 oikeusministeriön tiloissa osoitteessa Eteläesplanadi 10. Työpaja keskittyi liikennesektoria koskevien KAISUssa tunnistettujen lisätoimenpiteiden käsittelyyn. Työpajaan osallistuivat VN TEAS -projektin ohjausryhmän jäsenten lisäksi henkilöitä seuraavilta tahoilta: VTT, Traficom, Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä, Tampereen korkeakouluuyhteisö, Ympäristöministeriö, Työ- ja elinkeinoministeriö, Sitra, Liikenne- ja viestintäministeriö ja Valtiovarainministeriö. Pöyry ja Pöyryn alikonsultti Clonet toimivat työpajassa fasilitaattoreina.

Työpaja

Työpajan tavoitteena oli pohtia päästövähennysten kustannustehokkuuden laskentamenetelmiä sekä niihin liittyviä oletuksia, vahvuuksia, heikkouksia ja epävarmuustekijöitä. Työpajan tarkoituksena oli myös keskustella muiden maiden esimerkeistä ja niiden hyödynnettävyydestä sekä luoda ymmärrystä toimien ja toimenpiteiden keskinäisistä riippuvuussuhteista ja niiden vaikutuksesta laskentaan. Henkilöt jaettiin kahteen ryhmään, joista Ryhmä A käsitteli yksittäisiä toimenpiteitä kustannuskomponenttien,

vaihtoehtoiskustannuksen muodostamisen, laskentaperiaatteiden ja -oletusten sekä aikarajauksen kannalta. Ryhmässä B keskusteltiin eri lähestymistavoista päästövähennysten kustannustehokkuuden laskentaan.

Tärkeimmät havainnot

Ryhmässä A todettiin, että ennen laskentaa terminologiat on määriteltävä selvästi ja laskennan aikana on hyödynnettävä erillisiä oletuksia ja laskentakaavoja erilaisille toimijoille. Tämän lisäksi pienryhmä käsitteli perustasoa, ns. baselinea, ja siihen liittyvää määrittelyä. Tärkeimpänä johtopäätöksenä ryhmän keskusteluista nousi esiin se, ettei kannata kehittää mitään uutta perusskenaariota vaan käyttää jo olemassa olevaa baselinea, joka perustuu käytännössä VTT:n ALIISA-malliin ja jota on käytetty myös KAISUn pohjana. Perusskenaarioon liittyen huomautettiin, että kansainväliset velvoitteet ja elinkaaren vaikutukset on otettava kattavasti huomioon aikajänteen osalta.

Ryhmässä B keskusteltiin eri vaihtoehdoista päästövähennysten kustannustehokkuuden laskentaan: yksittäistarkastelu, osittaistasapainomallit ja yleiset tasapainomallit. Yleisellä tasolla nousi esiin systeemiajattelun tärkeys: päästövähennystoimien mallinnus ja analysointi liikennesektorilla on haastavaa ja lähestymistavat vaativat systeemiajattelua. Keskustelussa nostettiin esille vertailukelpoisten skenaarioiden rakentamisen vaikeus ja niissä esiintyvät puutteet sekä baselinen muodostamiseen liittyvät epävarmuudet. Ryhmässä nostettiin myös esille asioita, jotka vaatisivat lisää huomioita, kuten henkilöliikenteen arviointi ja ison kuvan muodostaminen ottaen huomioon mm. kiertotalouden ja eri hintaskenaarioiden vaikutukset. Lisäksi työpajassa todettiin, että mitä useammalla toimenpiteellä päästövähennyksiä tavoitellaan, sitä tärkeämpää ristikkäisvaikutusten arviointi on.

Liite 2: Ilmastopolitiikan ja kasvihuonekaasupäästöjen laskennan viitekehykset

Ilmastopolitiikan suunnittelu ja toimenpiteiden arviointi Suomessa nojautuvat kansainvälisessä ilmastopolitiikassa määriteltyyn viitekehykseen.

Ilmastopimuksen taustalla on YK:n ilmastonsuojelun puitesopimus (UNFCCC). Kaikki EU maat on veloitettu seuraamaan päästöjään ja laskentajärjestelmästä on määrätty asetuksella. Kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion laatimisesta ja ylläpitämisestä on annettu Euroopan komission täytäntöönpanoasetus (EU) N:o 749/2014 (Euroopan komissio 2014). Suomen on raportoitava vuotuisista päästöistään Kioton pöytäkirjan veloitteiden mukaisesti YK:n ilmastopimuksen sihteeristölle.

Taakanjakosektoria koskevat päästöt, joita on käsitelty tässä raportissa ja jotka laskeaan kansalliseen inventaarioon ovat Suomen osalta (Euroopan komissio 2014 ja Tilastokeskus 2019):

- maataloussektori: kotieläinten ruoansulatuksen CH₄-päästöt, lannankäsittelyn CH₄- ja N₂O-päästöt, maaperän N₂O-päästöt, kasvintähteiden pellolla polton N₂O-päästöt sekä kalkituksen ja urealannoituksen CO₂-päästöt
- energiasektori: polttoaineiden energiakäyttö (kuten tieliikenne) sekä polttoaineiden tuotantoon, jakeluun ja kulutukseen liittyvät haihtuma- ja karkauspäästöt

Lisäksi erikseen raportoidaan muita päästöjä (yhteenvetotaulukon 1A mukaisesti) mm. kansainvälisen lentoliikenteen ja vesiliikenteen aiheuttamat päästöt ja epäsuorat N₂O-päästöt. Kasvihuonekaasuinventaarion kuuluu myös ohjeiden mukainen epävarmuuksien ja herkkyyksianalyysin laatiminen ennusteista. LULUCF –sektorin päästöjä käsitellään Kioton pöytäkirjan perusteella seuraavasti: CO₂-päästöt ja -poistumat maankäyttöluokista metsämaa, viljelysmaa, ruohikkoalueet, kosteikot, rakennetut alueet ja muu maa. Lisäksi raportoidaan mm. puutuotteiden, maastopalojen ja metsäkuolituksen päästöt sekä pellonraivauksen, metsälannoituksen, ojitettujen metsämaiden ja turvetuotantoalueiden N₂O-päästöt ja ojitettujen metsämaiden ja turvetuotantoalueiden CH₄-päästöt. Jäsenvaltioiden on myös raportoitava ilmastomuutosta hillitsevien yksittäisten poliitikkojen ja toimien tai politiikka- ja toimikokonaisuuksien ennakoidut ja toteutuneet kustannukset ja hyödyt (Euroopan komissio 2014):

- Kustannukset euroina yhtä vähennettyä/sidottua CO₂-ekvivalenttitonnia kohti
- Absoluuttiset kustannukset vuodessa euroina
- Kustannusarvioiden kuvaus (kustannusarvion perusta, arvioon sisältyvien kustannusten tyyppi, menetelmä)

Kasvihuonekaasuinventaarion laatimisesta Suomessa vastaa Tilastokeskuksen kasvihuonekaasujen inventaarioyksikkö. Raportointi kattaa seitsemän kasvihuonekaasua: hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), dityppioksidi (N₂O), HFC-yhdisteet, PFC-yhdisteet rikkiheksafluoridi (SF₆) ja typpitrifluoridi (NF₃). Suomi vakinaisti kasvihuonekaasujen arviointijärjestelmän vuonna 2004. Kansallinen järjestelmä perustuu Tilastokeskuksen ja asiantuntijalaitosten välisiin sopimuksiin päästölaskennan ja raportoinnin tuottamisesta sekä vastuullisten ministeriöiden kanssa tehtävään yhteistyöhön. Laskentaan asiantuntijalaitoksina osallistuvat Tilastokeskus, Suomen ympäristökeskus ja Luonnonvarakeskus. Tilastokeskus ostaa lisäksi joitakin osia laskennasta ostopalveluna. Kansallinen kasvihuonekaasujen inventaario ja sen tulosten raportointi antavat tiedollisen perustan ilmastopolitiikan suunnitteluun ja seurantaan. Sen vuoksi työn aikana tunnistettiin tarve vertailla päästöjen vähentämiskustannusten laskennan perusteena olevaa kasvihuonekaasupäästölaskentaa inventaarion laskentaperusteisiin. (Tilastokeskus 2019)

Kasvihuonekaasuinventaarion laskentaa ohjaa hallitusten välisen ilmastopaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ohjeistus. Raportointiin liittyvää lisäohjeistusta on annettu lisäksi aiemmin mainitun ilmastosopimuksen ja Kioton pöytäkirjan päätöksissä. Lisäksi kansallista inventaariota ja raportointia ohjaa EU:n seurantajärjestelmäasetus. Keskeisin IPCC:n laskentaa ohjaava ohjeistus on yleisestikin kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa sovellettava IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Erilliset ohjeistukset on annettu taakanjakosektorin toimintoihin liittyen seuraavasti: Energy, Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) ja Waste. Maatalouden osalta laskentaohjeisto sisältää mm. viljelysmaat (cropland), grassland (ruohopeitteiset maat), wetlands (kosteikot tai suot), kotieläinten ja lannan käsittelyn (emissions from livestock and manure management) ja typpioksiduulipäästöt maaperästä ja hiilidioksidipäästöt kalkin ja urean käytöstä (N₂O emissions from managed soils, and CO₂ Emissions from lime and urea application). Vuoden 2006 ohjeistuksen lisäksi Suomi on käyttänyt vuonna 2013 laadittuja täydennyksiä LULUCF -sektorin osalta ja kosteikkojen ja suoalueiden täydennettyä ohjeistoa orgaanisten maiden päästökertoimien valinnassa. (IPCC 2006 ja Suomen virallinen tilasto (SVT))

Euroopan komission ympäristötoimisto EEA on julkaissut ilmapäästöjen inventaarioita varten ohjeistuksen (The EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, päivitetty 2016). Kyseinen ohjeisto opastaa kansallisen päästöinventaarion laatimisessa. Ohjeistuksen tarkoitus on rajata laskentametologiaa siten, että kaikki EU maat raportoisivat päästönsä samalla tavalla ja eri maiden päästötietoja olisi mahdollista vertailla. Vuoden 2016 ohjeisto on yhdenmukainen IPCC:n laskentaohjeistuksen kanssa. Ilmapäästöinventarioiden ja kasvihuonekaasuinventarioiden keräämät tiedot ovat

kuitenkin erilaisia, sillä ilmapäästöinventaarioissa on huomioitava päästöjenvähentämistekniikat ym. laitospohjaiset tiedot. Ohjeistot on järjestetty yhdenmukaisesti perustuen NFR- koodeihin (Nomenclature for Reporting). (EEA 2016)

Yleinen kasvihuonekaasupäästöjen laskentamenetelmä kansainvälisesti on myös ns. kasvihuonekaasuprotokolla (GHG protocol), joka on Maailman luonnonvarainstituutin (WRI) and WBCSD:n (World Business Council for Sustainable Development) ylläpitämä menetelmä. Kasvihuonekaasuprotokolla sisältää erillisen ohjeistuksen julkisen sektorin laskennalle (maat ja kaupungit) ja maatalouden sektorin päästöjen laskennalle. Kasvihuonekaasuprotokolla ei kuitenkaan sisällä ohjeistusta kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion laatimista varten. Jotkin Euroopan ulkopuoliset maat ovat lähteneet kehittämään kansallista ohjelmaa perustuen kasvihuonekaasuprotokollaan. (GHG Protocol 2019)

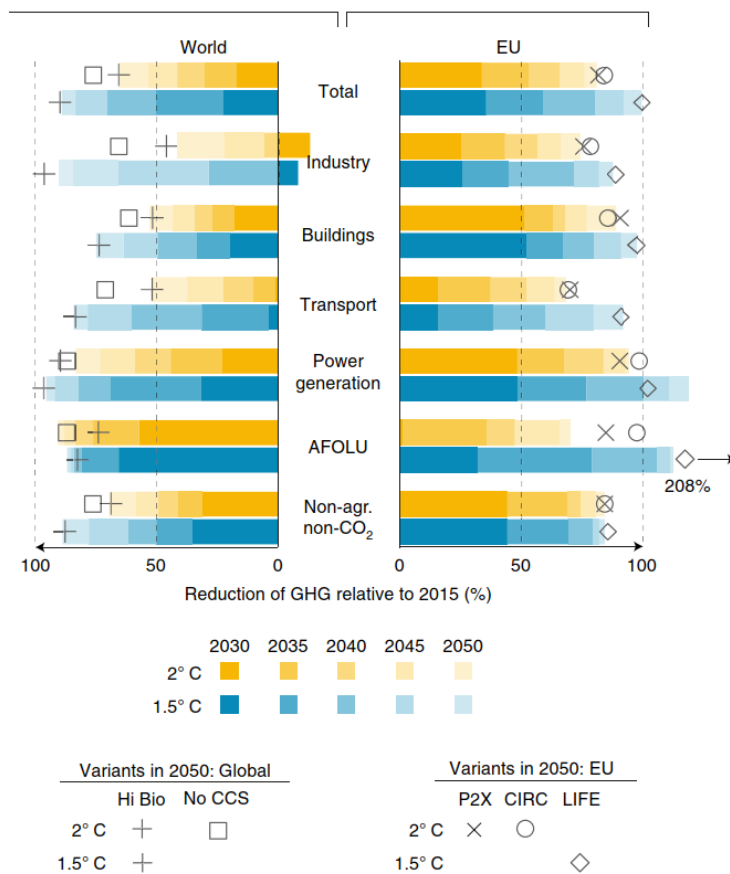
Kansainvälisesti kasvihuonekaasupäästövähennysten mallintamiseen sovelletaan integroituja arviointimalleja (Integrated Assessment Models IAM), jotka on kehitetty yhteistyössä päättäjiä, tutkijoiden ja taloustieteilijöiden kanssa. Esimerkkejä mallinnuksista ovat Itävaltalainen MESSAGE-GLOBIOM (International Institute for Applied Systems Analysis IIASA), hollantilainen IMAGE (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency) ja POLES, joka on Euroopan komission Joint Research Centren laatima kansainvälinen energiamallinnusjärjestelmä.

Myös kansainvälinen ilmastopaneeli IPCC viittaa viimeisimmässä arviointiraportissaan (AR5, vuodelta 2014) IAM -malleihin. IAM on mallinnustapa/ analyysimenetelmä, joka yhdistää tuloksia ja mallinnusta fyysisten, biologisten, taloudellisten ja sosiaalisten tietojen ja näiden välisten interaktioiden välillä yhtenäiseksi menetelmäkehikoksi, jonka avulla voidaan arvioida nykytilannetta ja ympäristössä tapahtuvien muutosten vaikutuksia ja politiikkatoimenpiteiden vaikutuksia siihen. Mallit tutkivat useiden sektoreiden välisiä interaktioita tai tiettyjen systeemien osa-alueita, kuten esimerkiksi energiasysteemi. Mallit ovat usein globaaleja, mutta niitä voidaan soveltaa myös kansallisesti.

Euroopan komission sivuilla on julkaistu ohjeistus IAM-mallinnukseen perustuvien arviointien laatimisesta pitkän aikavälin ilmastostrategioiden laatimista varten (Weitzel ym. 2019). Julkaisussa viitataan eri maiden velvoitteeseen raportoida ilmastostrategioista YK:n ilmastonsuojelun puitesopimukseen pohjautuen ja esitetään, että julkaisun tiedoista voi olla hyötyä useille maille niiden laatiessa strategiaa pitkän aikavälin ilmastotoimille vuosina 2019 ja 2020. Euroopan komissio laati julkaisun "In-depth analysis in support of the Commission Communication COM (2018) 773" (Euroopan komissio 2018) tukemaan sen ehdotusta pitkän aikavälin strategiseksi visioksi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä. Tämän julkaisun mukaan arviointi on perustunut pitkälti laadulliseen ja monialaiseen mallinnukseen. Euroopan komission ehdotus hyö-

dyntää EU-fokusoituneita malleja 80 % kasvihuonekaasupäästövähennemän aikaansaamiseksi vuoteen 1990 verrattuna, ilmastoneutraaliteetin saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä ja huomioi globaalit ilmaston lämpenemisen 2 ja 1,5 Celcius -asteen raja-arvot. Integroidut mallinnustyökalut huomioivat EU:lle tyypilliset energiankäytön, maankäytön, maatalouden ja yleisesti talouden osatekijät sekä kaikki sektorit ja kasvihuonekaasupäästöt. (Weitzel ym. 2019)

Kuva 1 Kuvaote julkaisusta Weitzel ym. 2019. EU päästövähennykset sektoreittain IAM- mallinnukseen pohjautuen.



Kun arvioidaan pitkän aikavälin kehitystä, epävarmuuksia on runsaasti. Tämän vuoksi on tärkeää kehittää laadullisiin skenaarioihin perustuva muodollinen arviointikehikko, joka auttaa strategian laatimisessa ja seurannassa, mutta selkeyttää myös sen perusteena olevat oletukset. Julkaisussa Weitzel ym. on esitetty EU-tasolla käytettävissä olevat mallinnukset: Energiamallinnus (POLES-JRC, FORECAST, PRIMES ja IMAGE), maatalous ja maankäyttö (GLOBIOM, G4M ja CAPRI) ja talusmallit (JRC-GEM-E3, QUEST ja E3ME). Nämä mallit ovat vuorovaikutuksessa keskenään ja jakavat myös skenaario-oletuksia. (Weitzel ym. 2019)

Liite 3: Liikennesektorin esimerkkilaskelma

Esimerkkilaskelma on tehty suoraviivaisesti olettamalla sähköautojen korvaavan tasanaisesti polttomoottoriautojen uusmyynnin siten, että 250 000 sähköauton tavoite saavutetaan (tässä vaiheessa mukaan ei ole oletettu ladattavia hybridautoja). Laskennassa ei ole erikseen mallinnettu käyttöönottoskenaariota, mutta se pohjautuu olemassa oleviin tavoitteisiin, jotka toisaalta perustuvat käyttöönottomallinnukseen. Tässä osiossa käsitellään laskentaperiaatteet tarkemmin. Oletukset ja niiden perustelut on avattu osiossa 7.1.4.

Päästövähennys on laskettu vertaamalla sähköautojen ja polttomoottoriautojen päästökertoimia vuositason per auto, kertomalla nämä sähköautojen lukumäärällä vs. perusura ja summaamalla päästövähennykset laskentavuosien yli:

$$Päästövähennys = \sum (P_{Polttomoottori} - P_{Sähkö}) \times (n_{sähkö,sken} - n_{sähkö,perusura}),$$

jossa P on päästökerroin ja n on lukumäärä. Päästökertoimet on laskettu per kuljettu kilometri ja kerrottu VTT:n ALIISA-autokantamallin kuljetussuorite-ennusteella jokaisena vuonna. Polttomoottoriautojen päästökerroin perustuu VTT:n LIPASTO-laskentajärjestelmän arvioihin vuonna 2016, jota on jatkettu tulevaisuuteen kertomalla se vuosittain oletetulla energiatehokkuden kasvukertoimella. Kasvukerroin perustuu AEA (2012) -selvitykseen. Sähköautojen päästökerroin perustuu arvioituun sähköauton energiakulutukseen per kuljettu kilometri, joka kerrotaan sähkön keskimääräisellä päästökertoimella Suomessa. Sähkön kulutuksessa huomioidaan akun hyötysuhde ja teknologian kehitys laskemalla keskimääräistä kulutusta kasvukertoimella.

Kustannukset on laskettu vertaamalla sähköautojen hankintakustannuksia ja käyttökustannuksia polttomoottoriautojen kustannuksiin. Jokaisena vuotena laskentaskenaariossa syntyy kustannuksia sähköauton ja polttomoottoriauton hankintakustannusten erotuksen verran kerrottuna sähköautojen lukumäärällä. Sähköautojen investointikustannusten oletetaan laskevan tasolta 38,5 kEUR tasolle 26 kEUR esimerkkilaskelmassa vuoteen 2030 mennessä. Vuositasolla investoinikustannuksia syntyy täten esim. vuonna 2030 26 vähennettynä 20 kEUR kerrottuna sähköautojen lukumäärällä vaihtoehtoskenaariossa vs. perusura. Tämän jälkeen syntyy käyttökustannussäästöjä 9 vuoden ajan bensiinin ja sähkön hintaerotuksen verran. Polttomoottoriauton energiankulutus oletus perustuu LIPASTO-mallin keskimääräiseen arvioon, jota on kerrottu energiatehokkuuskertoimella. Sähköautojen käyttökustannukset perustuvat kokonaisuudessaan sähkön hintaan (energian hinta, siirtomaksut ja verot) sekä oletettuun sähkökulutukseen samalla periaatteella kuin edellä kuvattu päästöjen laskenta. Hintaoletukset perustuvat energia- ja ilmastostrategian taustaskenaarion hintaoletuksiin. Polttoaineen kohdalla bensiinin hinnan on oletettu osittain korreloivan raakaöljyn hinnan kanssa.

Näiden perusteella lasketaan kustannusten nettonykyarvo:

$$NPV (Kustannukset) = \sum \frac{I_i + K_i}{(1+p)^i},$$

Jossa I on investointikustannukset vuonna i, K on käyttökuukustannukset vuonna i, ja p on diskonttokorko. Kustannustehokkuus on laskettu jakamalla kustannusten nettonykyarvo (negatiivisella etumerkillä) kokonaispäästövähennyksillä.

Liite 4: Rakennusten erillislämmityssektorin esimerkkilaskelma

Toimenpiteen päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta on suoritettu vertaamalla perusuraa valittuun skenaarioon. Tarkastelussa on ensin suoritettu päästövähennyslaskenta ja sitten kustannuslaskenta. Lopuksi nämä on yhdistetty kustannustehokkuuslaskennassa. Laskennan lähestymistapa on samanlainen kaikille skenaarioille.

Päästövähennykset

Päästövähennykset on laskettu seuraavalla kaavalla:

$$\frac{\text{Päästö (öljy - MLP)}}{\text{Määrä (MLP, BAU - skenario)}} \div 1000$$

Missä:

- Päästö (öljy) = päästökerroin \div hyötysuhde = 281,4 gCO₂/kWh-lämpö (pysyy samana koko tarkasteluperiodin aikana)
- Päästö (MLP) = Päästö (maalämpöpumppu) = päästökerroin \div hyötysuhde = 54,7 gCO₂/kWh-lämpö vuonna 2018 ja 31,7 gCO₂/kWh-lämpö vuonna 2030 (tippuu lineaarisesti tarkasteluperiodin aikana)
- Määrä (MLP, BAU – skenario) = tarvittavat maalämpöpumppujen määrä (MWh) kunakin vuonna laskettu vertaamalla skenaariota perusuraan (BAU)
 - Perusurassa otetaan huomioon purkuasteen vaikutus tilojen määrään (5 %)
 - Skenaarioita on kolme, joissa ensimmäisessä öljylämmitys tippuu lineaarisesti 0 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä, toisessa öljylämmitys tippuu nopeasti 0 prosenttiin ja kolmannessa öljylämmitys tippuu vasta myöhäisessä vaiheessa 0 prosenttiin
- 1000 = muuntokerroin oikeaan yksikköön

Kustannukset

Kustannuksien osalta on tarkasteltu erikseen kiinteitä ja muuttuvia kustannuksia ja laskettu ne yhteen kunkin vuoden osalta:

$$\sum_{i=0}^n \text{Määrä (MLP)} \times (\text{OPEX (öljy)} - \text{OPEX (MLP)}) + \text{CAPEX (skenario)}$$

Jossa n = tarkasteluvuosi

Ja OPEX (öljy) = valmistevero + kevyen polttoaineen hinta = EUR/MWh-lämpö

Ja OPEX (MLP) = sähkön hinta + sähkövero + sähkön siirtohintaa = EUR/MWh-lämpö

Ja CAPEX (skenaario) on:

$$\text{Määrä (korvattava MLP, } n - n - 1) \times \text{CAPEX per MWh (} n) \times 1000 \times (2030 - n + 1) \div 20$$

Jossa määrä (korvattava MLP) = määrä öljylämmitystä, joka pitää korvata maalämmöllä verrattaessa perusuraa ja skenaariota = MWh-lämpö

Ja CAPEX per MWh (n) = (investoinnit + O&M kiinteät) ÷ määrä (korvattava MLP, n) = EUR/MWh-lämpö

Kustannusten lähtötiedot ja kehitys on kuvattu tarkemmin kappaleessa 0.

Kustannustehokkuus

Kustannuksia on tarkasteltu raportissa sekä kumulatiivisesti vuoteen 2030 asti että vain vuonna 2030. Kustannukset on diskontattu 3,5 % diskonttokorolla. Kustannustehokkuus on laskettu jakamalla kokonaiskustannukset päästövähennyksellä:

$$\text{Kustannustehokkuus} = \frac{-\text{Kokonaiskustannukset}}{\text{Päästövähennys}}$$

Liite 5: Maataloussektorin esimerkkilaskelma

Päästövähennykset

Toimenpiteen päästövähennysten kustannustehokkuuslaskenta on suoritettu vertaamalla perusuraa valittuun toimenpiteeseen. Tarkastelussa on ensin suoritettu päästövähennyslaskenta ja sitten kustannuslaskenta. Lopuksi nämä on yhdistetty kustannustehokkuuslaskennassa. Päästövähennykset on laskettu seuraavalla kaavalla.

$$\text{Päästövähennys}_{EK45} = PEV_{perusura} - PEV_{toimenpide} + HN_{puut}$$

$$\begin{aligned} \text{Päästövähennys}_{EK45} &= 9\,120\,257 \text{ tCO}_2e - 7\,681\,849 \text{ tCO}_2e + 2\,214\,481 \text{ tCO}_2e \\ \text{Päästövähennys}_{EK45} &= 3\,652\,889 \text{ tCO}_2e \end{aligned}$$

Missä:

- PäästövähennysEK45 = Päästövähennyksen suuruus, kun toimenpiteen elinkaari on 45 vuotta.
- PEVperusura = Päästöt eloperäisen maan viljelystä (PEV) Kasvihuonekaasupäästöt eloperäisten maiden viljelystä. Kumulatiivinen arvo, 45 vuotta.
- PEVtoimenpide = Kasvihuonekaasupäästöt eloperäisten maiden viljelystä (heikko-tuottoiset) eloperäisten maiden metsitys toimenpiteessä. Kumulatiivinen arvo, 45 vuotta.
- HNpuut = Hiilinielut istutetuista puista. Kumulatiivinen arvo 45v.

Kuten maatalouskappaleen esimerkkilaskennassa todettiin, maatalouteen liittyvät päästövähennystoimenpiteet yleensä leikkaavat useita sektoreita, kuten LULUCF-sektorin. Eloperäisten maiden metsitys –toimenpiteen päästövähennysten kustannustehokkuus laskenta sisältää päästövähennyksiä niin LULUCF- kuin maataloussektorille.

Taulukko-1 Päästövähennykset eloperäisten maiden metsityksessä eri sektoreilla

Yksikkö kaavassa	Päästölähde	Päästö/nielu	Määrä t CO ₂ e (45 v)	Sektori
PEVperusura	Maaperästä vapautuvat hiilidioksidipäästöt maanmuokkauksen seurauksena	Päästö	3 300 057	LULUCF
PEVperusura	Typpipitoisten väkilannoitteiden käytöstä aiheutuvat N ₂ O-päästöt muutettuna KHK-päästöiksi	Päästö	5 820 200	Maatalous
PEVtoimenpide	Maaperästä vapautuvat hiilidioksidipäästöt maanmuokkauksen seurauksena	Päästö	2 779 586	LULUCF
PEVtoimenpide	Typpipitoisten väkilannoitteiden käytöstä aiheutuvat N ₂ O-päästöt muutettuna KHK-päästöiksi	Päästö	4 902 263	Maatalous
PEVtoimenpide	Puiden hiilinielujen suuruus	Hiilinielu	2 214 481	LULUCF

Puiden hiilinieluista otetaan huomioon vain maanpäällä kasvavaan puumateriaalin sitoutuva hiili. Alla olevassa kuvaajassa on kuvattu tässä esimerkkilaskennassa mallinnetun istutetun männikön kasvu. Kuvaajassa on esitetty toimenpiteessä määritelty tavoite, jossa vuoteen 2030 mennessä on istutettu 16 879 ha metsää eloperäisille viljaimille.

Kuva-2 Istutetun männikön (16 879 ha) vuosittainen kasvu



Hiilinielujen suuruus on määritelty vuosittaisen kasvun perusteella. Hiilinielujen laskennassa on oletettu puun tiheyden olevan 0,5 t/m³ ja hiilen osuus kuivassa puumassassa 50 %. Hiilen ja hiilidioksidin suhde on esitetty laskentaesimerkin oletuksissa.

Kustannukset

Kustannusten laskennassa lasketaan toimenpiteelle määritetyn elinkaaren aikaiset kustannukset (45 v) diskontattuna 3,5 %:n (ensimmäiset 20 vuotta) ja 1,5 %:n diskontauskorolla (seuraavat 25 vuotta) seuraavasti:

$$NPV (Kustannukset_{3,5\%}) = \sum_{t=1}^{20} \frac{MHK_t}{(1 + 0,035)^t} + \sum_{t=1}^{20} \frac{VMK_t}{(1 + 0,035)^t}$$

$$NPV (Kustannukset_{1,5\%}) = \sum_{t=1}^{25} \frac{MHK_t}{(1 + 0,015)^t} + \sum_{t=1}^{25} \frac{VMK_t}{(1 + 0,015)^t}$$

$$Kokonaiskustannukset_{EK45} = NPV (Kustannukset_{3,5\%}) + NPV (Kustannukset_{1,5\%})$$

$$Kustannukset_{EK45} = 111\,016\,544 \text{ €}$$

Missä:

- Kustannukset_{3,5%} = Toimenpiteen ensimmäisen 20 vuoden kustannukset diskontattuna nykyarvoksi 3,5 % diskonttauskorolla
- Kustannukset_{1,5%} = Toimenpiteen ensimmäisen 20 vuoden kustannukset diskontattuna nykyarvoksi 1,5 % diskonttauskorolla
- MHK= Metsänhoidon kustannus (MHK) kuluva vuonna
- VMK= Viljelijän menetetty kustannus (VMK). Viljatulon menetyksen kustannus kuluva vuonna. Kustannus tässä esimerkissä 176 EUR/ha/a (80 %)
- Kokonaiskustannukset_{EK45} = Kokonaiskustannukset toimenpiteelle määritetyn elinkaaren (45 v) ajalta

Tässä laskentakaavassa on katsottu tilannetta (skenaario 1), jossa viljatulo heikoktuottoisilla vilja-ajoilla olisi 176 EUR/ha/a (80 %). Eloperäisten maiden metsitys -toimenpiteen kustannustehokkuus saadaan seuraavasti:

$$Kustannustehokkuus = \frac{Kokonaiskustannukset_{EK45}}{Päästövähennys_{EK45}}$$

$$Kustannustehokkuus = 30,4 \text{ € / t CO}_2\text{e (Älä poista tätä sivunvaihtoa.)}$$

Lähteet

Aakkula, J., Asikainen, A., Kohl, J., Lehtonen, A., Lehtonen, H., Ollila, P., Regina, K., Salminen, O., Sievänen, R., & Tuomainen, T. 2019. Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 20/2019. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-650-8>

AEA. 2012. A review of the efficiency and cost assumptions for road transport vehicles to 2050. AEA/R/ED57444 Issue Number 1

AEA Technology plc. 2012. Next phase of the European Climate Change Programme: Analysis of Member States actions to implement the Effort Sharing Decision and options for further community-wide measures. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/effort/docs/esd_final_report_en.pdf

Afbi. 2015. FAPRI-UK Baseline projections 2015 [verkkoaineisto]. [Viitattu 17.10.2019] Saatavissa: <https://www.afbini.gov.uk/publications/fapri-uk-baseline-projections-2015>

Bayerische Landesantalt für Landwirtschaft (LfL). 2017. Treibhausgas-Emissionen in bayerischen landwirtschaftlichen Betrieben. Verknüpfung von erhobenen Betriebsdaten, Modellen und Geodaten als Grundlage für die Bewertung von Treibhausgas-Vermeidungsoptionen.

BEIS. 2018. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Valuation of Energy Use and Greenhouse Gas (Ghg) Emissions – Supplementary Guidance to the HM Treasury Green Book on Appraisal and Evaluation in Central Government.

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. 2016. Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung

BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 2014. Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Kabinettsbeschluss vom 3. Dezember 2014

CCC. 2015a. Committee for Climate Change. The Fifth Carbon Budget – The next step towards a low-carbon economy [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2015/11/Committee-on-Climate-Change-Fifth-Carbon-Budget-Report.pdf>.

CCC. 2015b. Committee for Climate Change. Sectoral scenarios for the Fifth Carbon Budget – Technical report [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa:

<https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2015/11/Sectoral-scenarios-for-the-fifth-carbon-budget-Committee-on-Climate-Change.pdf>.

CJC Consulting. 2014. Final report to the Forestry Commission: Assessing the cost-effectiveness of woodlands in the abatement of carbon dioxide emissions [verkkoaineisto]. [Viitattu: 17.10.2019]. Saatavissa: <https://forestry.gov.scot/publications/590-assessing-the-cost-effectiveness-of-woodlands-in-the-abatement-of-carbon-dioxide-emissions/viewdocument>

Clapp C. & Prag A. 2012. Projecting emissions baselines for national climate policy: Options for guidance to improve transparency [verkkoaineisto]. OECD & IEA. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://www.transparency-partnership.net/sites/default/files/ccxg_20123_national_baselines.pdf

Copenhagen Economics. 2016. Modellanalyser av svenska klimatmål [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.10.2019]. Saatavissa: <https://www.copenhageneconomics.com/dyn/resources/Publication/publicationPDF/8/358/1472721550/copenhagen-economics-2016-modellanalyser-av-svenska-klimatmal.pdf>.

De Cara, S. & Jayet, P-A. 2011. Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost effectiveness, and the EU non-ETS burden sharing agreement. Ecological Economics, Vol. 70:9, S. 1680 – 1690. ISSN: 0921-8009 (sähköinen). Saatavissa: DOI:10.1016/j.ecolecon.2011.05.007

EEA. 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>.

EEA. 2019. EEA database on climate change mitigation policies and measures in Europe [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: http://pam.apps.eea.europa.eu/?source=%7B%22query%22%3A%7B%22match_all%22%3A%7B%7D%7D%2C%22display_type%22%3A%22tabular%22%2C%22sort%22%3A%5B%7B%22Country%22%3A%7B%22order%22%3A%22asc%22%7D%7D%2C%7B%22ID_of_policy_or_measure%22%3A%7B%22order%22%3A%22asc%22%7D%7D%5D%2C%22highlight%22%3A%7B%22fields%22%3A%7B%22*%22%3A%7B%7D%7D%7D%7D

Ekholm, T. 2010. Päästökauppaan kuulumattomien sektoreiden päästövähennykset ja niiden kustannustehokkuus. Tutkimusraportti VTT-R-02783-10 [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/VTT-R-02783-10.pdf>

Ekholm, T. 2017. Taakanjakosektorin päästövähennysten kustannukset ja joustot [esitys 9.5.2017]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/no-name/%7BE0BF8CEA-F21C-4BA3-AB8A-AC180ACFDAD6%7D/127828>

Element Energy Limited. 2013. Review of potential for carbon savings from residential energy efficiency. Final report for the Committee on Climate Change. Saatavissa: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2013/12/Review-of-potential-for-carbon-savings-from-residential-energy-efficiency-Final-report-A-160114.pdf>

Element Energy Limited. 2015. Research on district heating and local approaches to heat decarbonization. A study for the Committee on Climate Change. Main report. Saatavissa: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2015/11/Element-Energy-for-CCC-Research-on-district-heating-and-local-approaches-to-heat-decarbonisation.pdf>

Element Energy 2011. Achieving deployment of renewable heat. Raportti CCC:lle (The Committee on Climate Change)

Element Energy 2017. Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential in the Scottish Transport Sector From Recent Advances in Transport Fuels and Fuel Technologies. Report to Transport Scotland

Energimyndigheten. 2017. Drivmedel 2016 – Mängder, komponenter och ursprung rapporterade enligt drivmedelslagen och hållbarhetslagen – ER 2017:12. Energimyndigheten. ISSN: 1403-1892 (painettu). Saatavissa: <https://energimyndigheten.a-w2m.se/FolderContents.mvc/Download?ResourceId=104636>

Eory, V., MacLeod, M., Topp, C.F.E., Rees, R.M., Webb, J., McVittie, A., Wall, E., Borthwick, F., Watson, C., Waterhouse, A., Wiltshire, J., Bell, H., Moran, D. & Dewhurst, R. 2015. Review and update the UK Agriculture Marginal Abatement Cost Curve to assess the Greenhouse gas abatement potential for the 5th carbon budget period and to 2050 [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2015/11/Scotland%E2%80%99s-Rural-Collage-SRUC-Ricardo-Energy-and-Environment-2015-Review-and-update-of-the-UK-agriculture-MACC-to-assess-abatement-potential-for-the-fifth-carbon-budget-period-and-to-2050.pdf>

Eory, V., Pellerin, S., Garcia, G.C., Lehtonen, H., Licite, I., Mattila, H., Lund-Sørensen, T., Muldowney, J. & Popluga, D. 2018. Marginal abatement cost curves for agricultural climate policy: State-of-the art, lessons learnt and future potential. Journal of cleaner production 182: 705-716.

Euroopan komissio. 2014. Euroopan komission täytäntöönpanoasetus (EU) N:o 749/2014 jäsenvaltioiden Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) N:o 525/2013 mukaisesti raportoimien tietojen rakenteesta, muodosta, toimittamistavasta ja tarkastamisesta [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014R0749&from=EN#d1e32-47-1>

Euroopan komissio. 2016. COM/2016/482 - Proposal for a Regulation on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 for a resilient Energy Union and to meet commitments under the Paris Agreement and amending Regulation No 525/2013 of the European Parliament and the Council on a mechanism for monitoring and reporting green-house gas emissions and other information relevant to climate change. European Commission. Brussels, 20.7.2016 COM(2016) 482 final. 2016/0231(COD) [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016PC0482>

Euroopan komissio. 2018. In-dept analysis in support of the Commission communication COM(2018) 773. A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf

Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto. 2018. EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) 2018/842 (ns. taakanjakoasetus) [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0842&from=en>

Eurostat 2019. Energy prices in 2018 - Household energy prices in the EU increased compared with 2017. News release. 88/2019 - 21 May 2019

FAO. 2012. Bockel, L., Sutter, P., Touchemoulin, O. & Jönsson, M. Using Marginal Abatement Cost Curves to realize the Economic Appraisal of Climate Smart Agriculture Policy Options. The EX Ante Carbon-balance Tool [verkkoaineisto]. [Viitattu 17.10.2019]. Saatavissa: <http://www.fao.org/3/a-bq866e.pdf>

FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. 2009. CO2-Verminde rung in Deutschland [verkkoaineisto.] [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/ressourcen-und-klimaschutz/230-co2-verminderung-in-deutschland>

Forster, D., Williams, R. & Dauwe, T. 2016. Supporting study for the evaluation of Decision No 406/2009/EC (Effort Sharing Decision). Final Report. [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a8d28f0e-7b1b-4b2e-943e-7cc030f48dda/language-en>

Fraunhofer ISI, INFRAS, IFEU. 2013. Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/texte_11_2013_frey_wirtschaftliche_aspekte_nichttechnischer_massnahmen_zur_emissionsminderung_im_verkehr1.pdf

Frontier Economics. 2013. Pathways to high penetration of heat pumps. Report prepared for the committee on climate change. Saatavissa: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2013/12/Frontier-Economics-Element-Energy-Pathways-to-high-penetration-of-heat-pumps.pdf>

Gerarden T.D., Newell R.G., & Stavins R.N. 2017. Assessing the Energy-Efficiency Gap. Review of Environmental Economics and Policy, volume 8, issue 1, 2014, pp. 18–38

GHG Protocol. 2019. Greenhouse Gas Protocol [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <http://ghgprotocol.org/>

Gillingham K. & Palmer K., 2014. Bridging the Energy Efficiency Gap: Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence. Journal of Economic Literature 2017, 55(4), 1486–1525

Granskog, A., Gulli, A., Melgin, T., Naucler, T., Speelman, E., Toivola, L. & Walter, D., 2018a. Cost-efficient emission reduction pathway to 2030 for Finland. Opportunities in electrification and beyond. Sitra studies 140. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISBN 978-952-347-083-5 (PDF). ISSN 1796-7112 (PDF). Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2018/11/30102722/cost-efficient-emission-reduction-pathway-to-2030-for-finland.pdf>

Gov.uk, 2019. Green Book supplementary guidance: valuation of energy use and greenhouse gas emissions for appraisal. <https://www.gov.uk/government/publications/valuation-of-energy-use-and-greenhouse-gas-emissions-for-appraisal>. Käyty 21.10.2019

Hast A., Ekholm T. & Savolainen I. 2011. Suomen kansallisten päästövähennystoimien epävarmuuksien ja riskien arviointi. VTT Working papers 165 [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISBN 978-951-38-7512-1. ISSN 1459-7683. Saatavilla: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2011/W165.pdf>

Harthan, R. O., Bergmann, T., Blanck, R., Bürger, V., Dehoust, G., Greiner, B., Hennenberg, K., Hes-se, T., Ludig, S., Rohde, C., Scheffler, M., Schlomann, B., Steinbach, J., Wiegmann, K. & Zell-Ziegler, C. 2017. 2017. Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2016.pdf>

Hill, N., Windisch, E., Kirsch, F., Horton, G., Dun, C., Hausberger, S., Matzer, C., Skinner, I, Donati, A.V., Krause, J., Thiel, C. & Wells, P. 2018. Improving understanding of technology and costs for CO2 reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves [verkkoaineisto]. Ricardo Energy & Environment, TERP, TU Graz, Cardiff Business School, EC Joint Research Centre. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/docs/ldv_co2_technologies_and_costs_to_2030_en.pdf

HM Treasury 2018 The Green Book - Central government guidance on appraisal and evaluation

IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)] [verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2019]. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf

IPCC. 2019. Climate Change and Land -erikoisraportti [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://www.ipcc.ch/report/srccl/>

IPCC WG III. 2001. Climate change 2001 Mitigation, Contribution of working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

[verkkoaineisto]. [Viitattu 22.20.2019]. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIII_TAR_full_report.pdf

Kesicki F., 2012. Intertemporal issues and marginal abatement costs in the UK transport sector. *Transportation Research Part D* 17 (2012) 418–426

Klimont, Z & Winiwarer, W. 2015. Chapter 9: Estimating Costs and Potential for Reduction of Ammonia Emissions from Agriculture in the GAINS Model. Teoksessa: Reis, S., Howard, C. & Sutton, M.A. (toim.) 2015. *Cost of Ammonia Abatement and the Climate Co-Benefits*. Dordrecht (Netherlands): Springer. S. 233-261. ISBN: 978-94-017-9722-1 (verkkojulkaisu).

Koljonen, T., Lehtilä, A., Grandell, L., Airaksinen, M., Tuominen, P., Järvi, T., Laurikko, J., Sipilä, K., Helynen, S., Honkatukia, J., Kallio, M., Salminen, O., Kivinen, M., Vuori, S., Kihlman, S. & Lauri, L. 2014. Low Carbon Finland 2050 -platform: vähähiilipolkujen kiintopisteet ja virstanpylväät. Yhteenvedo hankkeen tuloksista ja johtopäätöksistä. *VTT Technology* 167. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>.

Koljonen, T., Soimakallio, S., Ollikainen, M., Lanki, T., Asikainen, A., Ekholm, T., Hildén, M., Honkatukia, J., Lehtilä, A., Saarinen, M., Seppälä, J., Similä, L. & Tiittanen, P. 2017. Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman vaikutusarviot. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 57/2017. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://tietokayttoon.fi/documents/10616/3866814/57_Keskipitk%C3%A4n+aikav%C3%A4lin+ilmastopolitiikan+suunnitelman+vaikutusarviot.pdf/69816509-9cff-45f7-b183-2c7e0cd102a1/57_Keskipitk%C3%A4n+aikav%C3%A4lin+ilmastopolitiikan+suunnitelman+vaikutusarviot.pdf?version=1.0

Koljonen, T., Soimakallio, S., Lehtilä, A., Similä, L., Honkatukia, J., Hildén, M., Rehunen, L.S., Salo, M., Savolahti, M., Tuominen, P. & Vainio, T. 2019. Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019. [Verkkojulkaisu]. Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161409/24-2019-Pitkan%20aikavalin%20kokonaispaastokehitys.pdf>

Lehtilä, A., Koljonen, T., Airaksinen, M., Tuominen, P., Järvi, T., Laurikko, J., Similä, L. & Grandell, L. 2014. Low Carbon Finland 2050 -platform. Energy system pathways towards a low carbon society. *VTT Technology*. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISSN 2242-122X (verkkojulkaisu). Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T165.pdf>

Lehtonen, H., Ruiz-Ramos, M., Palosuo, T., Winqvist, E., Rodríguez, A., Garrido, A., Lorite, I., Gabaldón, C., Santos, C., Hoffman, M., & Rötter, R. 2019. Description of the improved agricultural systems in the case study regions based on SI and other options. Deliverable 2.3 of FACCE SURPLUS SUSTAg [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.10.2019]. Saatavissa: <http://projects.au.dk/faccesurplus/research-projects-1st-call/sustag/>

Lindroos, T.J., Hast, A., Ekholm, T. & Savolainen, I. 2012a Arvio ei-päästökauppasektorin päästövähennyskeinoista ja -kustannuksista. VTT Tiedotteita – Research Notes 2605. [Verkkoaineisto] . [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2605.pdf>

Lindroos, T.J., Monni, S., Honkatukia, J., Soimakallio, S. & Savolainen, I. 2012b. Arvioita uusiutuvan energian lisäämisen vaikutuksista Suomen kasvihuonepäästöihin ja kansantalouteen [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISBN 978-951-38-7624-1. ISSN 2242-122X. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T11.pdf>

Lipinski, B. & McGreay, H. 2010. Summary of Studies Estimating the Cost of Climate Change Adaptation in the Developing World Brian. World resources institute [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://pdf.wri.org/cost_of_adaptation_in_the_developing_world.pdf

Luonnonvarakeskus 2011. Taloustohtori – maannostiedot. Pintamaa tukialueittain [verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2019]. Saatavissa: https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/taloustohtori/maannostieto/vakioraportit/pintamaalajit_kansallinen_luokitus/pintamaa_tukialueittain

Luonnonvarakeskus 2015a. Maatilojen biokaasulaitosten kannattavuus ja kasvihuonekaasujen päästövähennys. Winqvist E. ym. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 36/2015 [verkkoaineisto]. [Viitattu 8.8.2019]. ISSN 2342-7639 (Verkkojulkaisu). Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/486091>

Luonnonvarakeskus 2015b. Maatalouden energia- ja ilmastopolitiikan suuntia vuoteen 2030. Hillintäkeinojen analyysi tilatason vaikutuksista ja keinojen hyväksyttävyydestä. Pasi Rikkinen (toim.) Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 35/2015 [verkkoaineisto]. [Viitattu 8.8.2019]. ISSN: 2342-7639 (Verkkojulkaisu). Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/486057>

Luonnonvarakeskus. 2019. Nurmi biokaasun raaka-aineena. RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. Rasi S. ym. Luonnonvara- ja biotalouden

tutkimus 46/2019 [verkkoaineisto]. ISSN 2342-7639 (Verkkojulkaisu). Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-789-3>

Maa- ja metsätalousministeriö. 2017. Maatalouden keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan sektorisuunnitelma [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa <https://www.ym.fi/download/noname/%7B0B069969-BDBB-4691-923A-A1CAB9AC9D8D%7D/127553>.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2019. Tuotannosta riippumaton perustuki [verkkoaineisto]. [Viitattu 11.11.2019]. Saatavissa <https://mmm.fi/perustuki>.

McKinsey & Company. 2009. Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Eine Studie von McKinsey & Company, Inc., erstellt im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“. Aktualisierte Energieszenarien und –sensitivitäten. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://bdi.eu/media/presse/publikationen/Publikation_Treibhausgasemissionen_in_Deutschland.pdf

Metayer M., Breyer C., Fell H-J. 2015. The projections for the future and quality in the past of the World Energy Outlook for solar PV and other renewable energy technologies.

Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A., Rantanen, P., Ollikainen, M. & Dahlbo, H. 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutukset ja kustannukset – jätehuollon vaihtoehtojen tarkastelu alueellisesta näkökulmasta. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 39/2008. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/14928390.pdf>

Naucmér, T. ja P. A. Enkvist (2009). Pathways to a Low-Carbon Economy - Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. McKinsey & Company.

NREAP Finland 2010, The 2020 national renewable energy action plan, Finland: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/dir_2009_0028_action_plan_finland.zip (22.10.2019).

Naturvårdsverket. 2017. Sweden's seventh national communication on climate change [verkkoaineisto]. [Viitattu 8.8.2019]. ISSN 0282-7298. Saatavissa: https://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom_/application/pdf/6950713_sweden-nc7-1-swe_nc7_20171222.pdf

Naturvårdasverket. 2018. Förslag till en långsiktig klimatstrategi för Sverige i enlighet med Parisavtalet. Redovisning av regeringsuppdrag (M2017/02742/KI) [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhället/miljoarbete-i-sverige/regeringsuppdrag/2018/redovisn-ru-Langsiktig-klimatstrategi-forslag-Sverige-Parisavtalet-20180427.pdf>

Naturvårdasverket. 2019. Resultat för Klimatklivet [verkkoaineisto]. [Päivitetty 4.5.2019, viitattu 8.8.2019]. Saatavissa: <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Bidrag/Klimatklivet/Resultat-for-Klimatklivet/>

Nijnik, M., Pajot, G., Moffat, A.J. & Slee, B. 2013. An economic analysis of the establishment of forest plantations in the United Kingdom to mitigate climatic change. Forest Policy and Economics. Vol. 26. S. 34-42. ISSN: 1389-9341.

Olhoff A., Dickson B., Puig D., Alverson K. 2016. The Adaptation Finance Gap Report, United Nations Environment Programme [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://web.unep.org/adaptationgapreport/2016>

Ollikainen, M.M.O., Järvelä, M., Peltonen-Sainio, P., Grönroos, J., Lötjönen, S.A., Kortetmäki, T., Regina, K., Hakala, K. & Palosuo, T. 2014. Ympäristöllisesti ja sosiaalisesti kestävä ilmastopolitiikka maataloudessa. Raportti 1/2014 [verkkojulkaisu]. Saatavissa: https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/Ilmastopaneeli_Ymparistollisesti-ja-sosiaalisesti-kestava-ilmastopolitiikka-maataloudessa.pdf

Ollikainen, M.M.O., Järvelä, M., Seppälä, J., Syri, S., Lötjönen, S. 2016. Keskipitkän aikavälin ilmasto-ohjelma: menetelmäkehikko ja tietotarpeen arviointi. Muistio ympäristöministeriölle, liitteineen. Tammikuu 2016. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 17.10.2019]. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BED65E0E9-9224-42EF-A971-BB96D6FADF61%7D/144080>.

Price P., Thornton S., Nelson S. 2007 The Social Cost of Carbon and the Shadow Price of Carbon: what they are and how to use them in economic appraisal in the UK. MPRA Paper No. 74976,

PwC. 2016. Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, Abschlussbericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [verkkojulkaisu]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Aktionsprogramm_Klimaschutz/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_abschlussbericht_bf.pdf

Pöyry Management Consulting Oy 2012. Työ- ja elinkeinoministeriö. Selvitys jätteen energiakäytöstä ja päästökaupasta. Raportti 25.6.2012. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2414868/Selvitys+j%C3%A4tteen+energiak%C3%A4yt%C3%B6st%C3%A4+ja+p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6kaupasta/71ea421c-4469-47e1-9c44-fb0cc69ec3c7/Selvitys+j%C3%A4tteen+energiak%C3%A4yt%C3%B6st%C3%A4+ja+p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6kaupasta.pdf>

Pöyry Management Consulting Oy 2019. Huoltovarmuuskeskus. Selvitys huoltovarmuudesta energiamurroksessa. Raportti 29.5.2019. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://cdn.huoltovarmuuskeskus.fi/app/uploads/2019/06/04101238/Huoltovarmuus_energiaturroksessa.pdf

Reis, S., Howard, C. & Sutton, M.A. (toim.) 2015. Cost of Ammonia Abatement and the Climate Co-Benefits. Dordrecht (Netherlands): Springer. ISBN: 978-94-017-9722-1 (verkkojulkaisu).

Repenning, J., Schumacher, K., Bergmann, T., Blanck, R., Böttcher, H., Bürger, V., Cludius, J., Emele, L., Jörß, W., Hennenberg, K., Hermann, H., Loreck, C., Ludig, S., Matther, F., Nissen, C., Scheffler, M., Wiegmann, K., Zell-Ziegler, c., Fleiter, T., Sievers, L., Pfaff, M., Thamling, N., Rau, D., Hartwig, H., Welter, S. 2019. Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung. Öko-Institut e.V, Fraunhofer ISI, Prognos, M-Five, IREES Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, FiBL. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Folgenabschaetzung-Klimaschutzplan-2050-Endbericht.pdf>

Riksrevisionen (RIR). 2019. Klimatkivet - stöd till lokala klimatinvesteringar [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISBN: 978-91-7086-507-7. Saatavissa: https://www.riksrevisionen.se/download/18.7df9df95168512424e317741/1547646400542/RIR_2019_1_ANPASSAD.pdf

Tamminen S., Haanperä O. & Hietaniemi T. 2018. Harnessing economic instruments to tackle the climate crisis. Finland's experiences with economic instruments applied in climate policy. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISBN 978-952-347-070-5 (PDF). Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2018/10/04163645/harnessing-economic-instruments-to-tackle-the-climate-crisis1.pdf>

Tamminen, S., Honkatukia, J., Leinonen, T. & Haanpää O. 2019. Technical report: How to implement a larger environmental tax reform in Finland? Potential instruments

and impacts [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2019/04/16135618/how-to-implement-a-larger-environmental-tax-reform-in-finland.pdf>

Trafikverket 2018. Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1 - Kapitel 20 English summary of ASEK Guidelines

Sipilä, E., Kiuru, H., Jokinen, J., Saarela, J., Tamminen, S., Laukkanen, M., Palonen, P., Nylund, N-O. & Sipilä, K. 2018. Biopolttoaineiden kustannustehokkaat toteutuspolut vuoteen 2030. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 63/2018. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-614-0>

Statista 2019. <https://www.statista.com/statistics/426988/united-kingdom-uk-heating-methods/>

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2014 Kasvihuonekaasuinventaarion laskennan ja raportoinnin ohjeistus [verkkoaineisto]. [Viitattu: 19.9.2019]. ISSN: 1797-6049. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/khki/2014/khki_2014_2015-12-14_men_001.html

Särkijärvi J., Jääskeläinen, S & Lohko-Soner, K. 2018. Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045. Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 13/2018 [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISBN PDF: 978-952-243-559-0. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-559-0>

Söderholm P. 2012. Modelling the Economic Costs of Climate Policy: An Overview. American Journal of Climate Change, 2012 1, 14-32

TEM 2017. Työ- ja elinkeinoministeriö. Taustaraportti kansalliselle energia- ja ilmastostrategialle vuoteen 2030 [verkkoaineisto]. [Päivitetty 2.2.2017, viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/3570111/Energia-+ja+ilmastostrategian+TAUSTARAPORTTI_1.2.+2017.pdf/d745fe78-02ad-49ab-8fb7-7251107981f7

Tilastokeskus. 2019. Kasvihuonekaasuinventaario [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: <https://stat.fi/tup/khkinv/index.html>

Tuominen, A., Tervonen, J., Järvi, T., Mäkelä, K., Liimatainen, H., Nykänen, L. & Reihonen, A. 2015. Liikenteen energiatehokkuustoimenpiteet osana EU:n 2030 ilmasto- ja energiatavoitteiden saavuttamista: vaikutukset, kustannukset ja työnjako. Tuominen

A. ym. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 14/2015. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79531/liikenteen%20energiatehokkuustoimenpiteet.pdf>

Umweltbundesamt (2012a): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden – Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten.

VanderZaag, A., Amon, B., Bittman, S. & Kuczynski, T. Chapter 5: Ammonia Abatement with Manure Storage and Processing Techniques. Teoksessa: Reis, S., Howard, C. & Sutton, M.A. (toim.) 2015. Cost of Ammonia Abatement and the Climate Co-Benefits. Dordrecht (Netherlands): Springer. S. 75-112. ISBN: 978-94-017-9722-1 (verkkojulkaisu).

Webb, J., Morgan, J. & Pain B. 2015. Chapter 6: Cost of Ammonia Emission Abatement from Manure Spreading and Fertilizer Application. Teoksessa: Reis, S., Howard, C. & Sutton, M.A. (toim.) 2015. Cost of Ammonia Abatement and the Climate Co-Benefits. Dordrecht (Netherlands): Springer. S. 113-135. ISBN: 978-94-017-9722-1 (verkkojulkaisu).

Weitzel M., Vandyck, T., Keramidis, K., Amann, M., Capros, P., Del Elzen, M., Frank, S., Tchung-Ming, S., Diaz Vazquez, A. & Saveyn, B. 2019. Model-based assessments for long-term climate strategies. Nature Climate Change. Vol: 9. S. 343-347. Saatavissa: DOI 10.1038/s41558-019-0453-5

WSP. 2017. Klimatklivet. En utvärdering av styrmedlets effekter [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/bidrag-och-ersattning/bidrag/klimatklivet/bilaga%201.wsp-rapport-utvardering-av-klimatklivets-effekter-170331.pdf>

WSP Analys & Strategi. 2018. Kostnadseffektiv styrning mot lägre utsläpp? Kostnadseffektivitet hos styrmedel för minskade växthusgasutsläpp i transportsektorn [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.trafa.se/globalassets/rapporter/underlagsrapporter/2018/kostnadseffektiv-styrning-mot-lagre-utslapp.pdf>

Ympäristöministeriö. 2017. Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopoliittikan suunnitelmasta vuoteen 2030: Kohti ilmastoviisasta arkea. Ympäristöministeriön raportteja 21/2017. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2019]. ISBN: 978-952-11-4748-7 (PDF). Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4748-7>

Ympäristöministeriö. 2019. Euroopan unionin ilmastopoliittika [verkkoaineisto]. [Viitattu 19.9.2019] Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastomuutoksen_hillitseminen/Euroopan_unionin_ilmastopoliittika

Zhang Z. X. & Folmer H. 1998. Economic modelling approaches to cost estimates for the control of carbon dioxide emissions. *Energy Economics* 20:1. S. 101-120. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(97\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(97)00019-4)

Östblom, G. 1999. An Environmental Medium Term Economic Model – EMEC. Working Papers 69, National Institute of Economic Research. [Viitattu 22.10.2019]. Saatavissa: <https://www.konj.se/download/18.66ca30f514fefe4be2534d58/1442923200790/Working-Paper-69-An-Environmental-Medium-Term-Economic-Model-EMEC.pdf>

TIETOKAYTTOON.FI

