



Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot

Tiina Koljonen | Jyrki Aakkula | Juha Honkatukia
| Sampo Soimakallio | Markus Haakana |
Hannu Hirvelä | Harri Kilpeläinen |
Leena Kärkkäinen | Juha Laitila | Antti Lehtilä |
Heikki Lehtonen | Liisa Maanavilja | Paula Ollila |
Hanne Siikavirta | Tarja Tuomainen

Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot

Tiina Koljonen, Antti Lehtilä, Hanne Siikavirta

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Jyrki Aakkula, Markus Haakana, Hannu Hirvelä, Harri
Kilpeläinen, Leena Kärkkäinen, Juha Laitila, Heikki
Lehtonen, Liisa Maanavilja, Paula Ollila, Tarja Tuomainen

Luonnonvarakeskus

Sampo Soimakallio

Suomen ympäristökeskus

Juha Honkatukia

Merit Economics



ISBN 978-951-38-8722-3

VTT Technology 366

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu)

DOI: 10.32040/2242-122X.2020.T366

Copyright © VTT 2020

JULKAISIJA – PUBLISHER

VTT

PL 1000

02044 VTT

Puh. 020 722 111

<https://www.vtt.fi>

VTT

P.O. Box 1000

FI-02044 VTT, Finland

Tel. +358 20 722 111

<https://www.vttresearch.com>

Alkusanat

Helmikuussa 2019 julkaistiin arviot Suomen pitkän aikavälin kokonaispäästökehityksestä (PITKO-hanke) sekä maatalouden ja maankäyttösektorin päästökehityksestä (MALULU-hanke). Molemmat tutkimushankkeet toteutettiin osana valtioneuvoston vuoden 2018 selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. Hankkeilla oli yhteinen, eri ministeriöiden edustajista koostuva ohjausryhmä, ja tutkimustyötä tehtiin yhteistyössä VTT:n, Syke:n ja Merit Economics:n (PITKO-hanke) sekä Luken (MALULU-hanke) kanssa. Syksyllä 2019 käynnistettiin molempien selvitysten jatkohankkeet, joissa laskennalliset ja laadulliset analyysit on osittain päivitetty siten, että laskelmien lähtökohdat ja kasvihuonekaasujen päästötavoite ovat linjassa nykyisen hallitusohjelman kanssa. Hankkeet ovat ensisijaisesti tuottaneet taustatietoa Euroopan komissiolle lähetettävän pitkän aikavälin strategian (LTS) laadinnassa, joka on osa EU:n hallintomalliasetuksen toimeenpanoa. Lisäksi tuloksia hyödynnetään taustatietona tulevien kansallisten energia- ja ilmastopolitiikkatoimien laadinnassa.

Tässä raportissa on esitetty VTT:n koordinoiman PITKO-jatko -hankkeen ja Luken toteuttaman MALUSEPO-hankkeen keskeiset tulokset ja skenaariolaskelmien lähtökohdat siltä osin, kun ne ovat muuttuneet verrattuna helmikuussa 2019 valmistuneisiin VN-TEAS-raportteihin. Hankkeiden yhteisen ohjausryhmän puheenjohtajana toimi Petteri Kuuva (TEM) ja ohjausryhmän jäseninä toimivat Birgitta Vainio-Mattila (MMM), Kaisa Pirkola (MMM), Magnus Cederlöf (YM), Riikka Siljander (YM), Saara Jääskeläinen (LVM), Susanna Perko (VNK), Ilari Valjus (VM) ja Juha Karila (siht., TEM). Hankkeiden lähtökohtia ja alustavia tuloksia esiteltiin ilmasto- ja energiapolitiiselle ministerityöryhmälle 9.9.2019 ja 11.11.2019. Lisäksi alustavia tuloksia esiteltiin Säätytalossa 15.11.2019 sidosryhmille ja medialle TEM:n järjestämässä kuulemistilaisuudessa.

Sisällysluettelo

Alkusanat	3
Symbolilista	6
1. Johdanto	8
2. Hiilineutraaliuden ja päästötavoitteen määrittelyt	11
3. Laskentamenetelmät ja lähdeaineistot	13
3.1 Kuvaus TIMES-VTT-mallista ja sen tietokannasta	13
3.2 Rakennuskannan energiankulutuksen REMA-malli.....	15
3.3 Maatalouden osittaistasapainomalli DREMFIA	16
3.4 Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous -sektorin laskenta..	18
3.4.1 Maankäytön ja maankäytön muutosten pinta-alojen määrittäminen	18
3.4.2 Metsävarojen kehityksen mallinnus MELA-ohjelmistolla	19
3.4.3 LULUCF-sektorin päästöjen ja poistumien laskenta	22
3.5 Kansantalouden tasapainomalli ja lähdeaineistot.....	23
3.6 Integroidut mallitarkastelut	24
4. Vertailu- ja vähäpäästöskenaarioiden päivitettyt kuvaukset	26
4.1 Yhteenveto skenaarioiden muodostuksen taustoista ja tärkeimmistä muutoksista	26
4.2 Teollisuus	28
4.2.1 Metsäteollisuus	28
4.2.2 Muu prosessiteollisuus.....	32
4.3 Energiantuotanto	33
4.4 Liikenne	34
4.5 Rakennukset	37
4.6 Maatalous.....	41
4.6.1 WEM-skenaario maatalouden osalta	41
4.6.2 Jatkuva kasvu -skenaario maatalouden osalta	42
4.6.3 Säästö-skenaario maatalouden osalta	45
4.6.4 Eri skenaarioiden vaikutus Suomen maatalouteen vuoteen 2050	46
4.6.5 Maatalouden muutosten vaikutus maankäyttöön	49
4.6.6 Maatalouden suuret muutokset mahdollisia	51
4.7 Maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous (LULUCF)	52
4.7.1 Metsän kasvu ja hakkuut eri skenaarioissa.....	52
4.7.2 Maankäytön muutokset eri skenaarioissa	55
5. Vaikutusarviot maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöihin	59
6. Vaikutusarviot LULUCF-sektorin kasvihuonekaasupäästöihin ja - poistumiin	63
6.1 Kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat eri skenaarioissa	63

6.2 Metsän hiilinielujen muutokset ja laskentatapojen vaikutukset: vertailua eri skenaariotöiden välillä	67
7. Vaikutusarviot energiatalouteen ja kasvihuonekaasupäästöihin	70
7.1 Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys	70
7.2 Energianhankinta	76
7.2.1 Primaarienergian kokonaiskulutus	76
7.2.2 Sähköenergian hankinta	79
7.2.3 Energian loppukulutus.....	82
7.3 Teollisuus	85
7.4 Liikenne	87
7.5 Jätehuollon sektori	89
8. Kansantalouden vaikutusarviot	91
8.1 FINAGE-laskentamalli	91
8.2 WEM-skenaario.....	94
8.3 Jatkuva kasvu-skenaario	95
8.4 Säästö-skenaario	97
8.5 Skenaarioiden vertailua.....	99
9. Ympäristövaikutusarviot (SOVA).....	103
10. Kokonaispäästökehitys ja arvio hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisesta	106
10.1 Kokonaispäästökehitys.....	106
10.2 Arviot tarvittavista toimenpiteistä	110
11. Yhteenveto ja johtopäätökset	115
Lähdeviitteet.....	123

Liitteet

- Liite A. Puunjalostuksen ja energiakäytön puuntarve aluetasolla Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaarioissa
- Liite B. Metsikkösimuloinnin kuvaus MELA2016-ohjelmistolla
- Liite C. Puuston runkotilavuuden, kasvun ja hakkuukertymän kehitys MALUSEPO-skenaarioissa
- Liite D. Metsien kehityksen ennustamisen erot MALULU- ja MALUSEPO-laskelmien välillä
- Liite E. Arviot LULUCF-sektorien päästöjen ja poistumien kehittymisestä eri skenaarioissa

Abstract Tiivistelmä

Symbolilista

CAP	Common Agricultural Policy, EU:n yhteinen maatalouspolitiikka
CHP	Combined Heat and Power eli yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
EU	Euroopan unioni
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, hallitusten välinen ilmastopaneeli
KHK	Kasvihuonekaasu
Luke	Luonnonvarakeskus
LVL	Laminoitu viilupuu
LTS	Long Term Strategy I. EU:n hallintomalliasetuksen mukainen pitkän aikavälin strategia
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry I. maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous -sektori
MALULU	Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050. Luken toteuttama VN-TEAS-hanke, joka valmistui helmikuussa 2019
MALUSEPO	Maatalous- ja LULUCF-sektorien kasvihuonekaasujen päästö- ja poistumaskaariaiot vuoteen 2050. Maa- ja metsätalousministeriön tilaama MALULU:n jatkohanke
MMM	Maa- ja metsätalousministeriö
PITKO	Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. VTT:n, Syken ja Merit Economics:n toteuttama VN-TEAS-tutkimushanke, joka valmistui helmikuussa 2019
PITKO-jatko	Työ- ja elinkeinoministeriön tilaama PITKO:n jatkohanke.
Syke	Suomen ympäristökeskus
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö

VN-TEAS Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminta
VTT Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
WEM With Existing Measures eli vertailuskenaario, jossa on huomioitu Suomen Energia- ja ilmastopolitiikat vuoteen 2020 mennessä, mutta ei vuodelle 2030 tehtyjä päätöksiä

1. Johdanto

Tiina Koljonen (VTT), Sampo Soimakallio (Syke), Jyrki Aakkula (Luke)

Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelmaan 10.12.2019 on kirjattu ”Hallitus toimii tavalla, jonka seurauksena Suomi on hiilineutraali vuonna 2035 ja hiilinegatiivinen nopeasti sen jälkeen. Tämä tehdään nopeuttamalla päästövähennystoimia ja vahvistamalla hiilinieluja.” (VN 2019) Hallitusohjelmassa ei täsmennetä hiilineutraaliuden määritelmää eikä sitä, miten se tulisi saavuttaa. Hallitus kuitenkin päättää lisätoimista, joilla päästövähennyspolku saadaan vastaamaan vuoden 2035 tavoitetta hiilineutraaliudesta. Hallitus on jo perustanut ilmasto- ja energia-asioihin keskittyvän ministerityöryhmän valmistelemaan ilmastopolitiikkaa kokonaisuutena, jonka puheenjohtajana toimii ympäristöministeri Krista Mikkonen.

Suomen mahdollisuuksia siirtyä vähähiiliyhteiskuntaan tarkasteltiin vuonna 2018–2019 toteutetussa PITKO (Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys) -hankkeessa yhteistyössä Teknologian tutkimuskeskus VTT:n, Suomen ympäristökeskuksen (Syke) ja Merit Economics:n kanssa (Koljonen et al. 2019a). PITKO-hanke toteutettiin osana valtioneuvoston vuoden 2018 selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa (tietokayttoon.fi) samoin kuin rinnakkainen, Luonnonvarakeskuksen (Luke) toteuttama MALULU (Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050) -hanke, jossa tarkasteltiin maataloussektorin ja maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous -sektorin (LULUCF) mahdollisuuksia vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja lisätä hiilinieluja vuoteen 2050 (Aakkula et al. 2019).

PITKO-hankkeen keskeinen tavoite oli arvioida, mikä on Suomelle sopiva päästövähennystavoite vuodelle 2050 ja mitkä ovat keskeiset toimialakohtaiset etenemisvaihtoehdot tavoitteen saavuttamiseksi. Tätä varten pääministeri Sipilän hallituksen biotalouden ja puhtaiden ratkaisujen ministerityöryhmä asetti syyskuussa 2018 PITKO-hankkeen laskelmien lähtökohdaksi, että Suomi vähentää vuoteen 2050 mennessä kasvihuonekaasupäästöjään 85–90 % vuoden 1990 tasoon verrattuna. LULUCF-sektorille ei sen sijaan asetettu laskelmissa erillistä tavoitetta, vaan kokonaispäästökehitys arvioitiin laskelmien tuloksena.

PITKO-hankkeessa laadittiin neljä vaihtoehtoista vähäpäästöskenaariota, joiden määritellyt perustuivat laajan asiantuntijajoukon kuulemiseen ja yhteistyöhön. Myös MALULU-hanke osallistui skenaarioiden laadintaan, mutta osa MALULU-hankkeen

laskennallisista skenaarioista oli laadittu eri lähtökohdista kuin PITKO-hankkeen skenaariot. Molemmille hankkeille määritettiin kuitenkin yhteinen vertailu-, eli WEM (With Existing Measures) -skenaario, joka noudatti myös energia- ja ilmastostrategialle 2016 sekä keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmalle (KAISU) laadittua vertailuskenaarioita.

PITKO-hankkeen keskeinen johtopäätös oli, että Suomi voi saavuttaa hiilineutraalisuustavoitteen vuoden 2040 tienoilla. Tulee kuitenkin huomioida, että PITKO-hankkeen lähtökohdista ei määritetty siten, että Suomi ja EU toteuttaisivat 1,5 asteen tavoitteen osana globaalia 1,5 asteen hillintätavoitetta. Eroavuudet ilmenevät lähinnä aikajakson 2030–2040 kunnianhimon tasossa ja mahdollisesti myös vuotta 2050 koskevan tavoitteen tasossa. Näin ollen PITKO-hankkeessa laaditut laskelmat eivät ole linjassa nykyisen hallitusohjelman tavoitteiden kanssa koskien erityisesti vuoden 2035 hiilineutraalisuustavoitetta.

Suomen ilmastopaneeli tarkasteli vuodelle 2035 asetetun hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamista selvityksessä, jonka keskeisenä johtopäätöksenä oli, että tavoitteen saavuttaminen on mahdollista, mutta päästövähennyksiin ohjaavia toimia on lisättävä ja nopeutettava (Seppälä et al. 2019a). Ilmastopaneelin hahmottelemassa sektorikohtaisessa päästöpolussa Suomen kasvihuonekaasupäästöt pl. LULUCF-sektori vähennettiin lähes 70 prosenttia vuoteen 2035 mennessä vuoden 1990 tasosta ja LULUCF-sektorin nettonielu oli vähintään jäljellä olevien kasvihuonekaasupäästöjen (21,4 Mt CO₂-ekv.) suuruinen (Seppälä et al. 2019a). Merkittävimmät päästövähennykset oletettiin tapahtuvan energiateollisuudessa. Selvityksessä ei kuitenkaan arvioitu esitetyn päästövähennyspolun sosiaalista oikeudenmukaisuutta eikä kustannustehokkuutta. Selvitys ei myöskään huomionnut nykyiseen infrastruktuurin uusiutumiseen liittyvää hitautta.

Suomen osalta keskeinen kysymys hiilineutraalisuustavoitteeseen liittyen on paitsi tavoitteen aikataulu ja siihen liittyvä päästövähennyspolku myös maankäytön nettonielujen kehitys vuoteen 2050. Tästä syystä syksyllä 2019 käynnistettiin PITKO:n jatkohanke (I. PITKO-jatko) sekä MALUSEPO (Maatalous- ja LULUCF-sektorien kasvihuonekaasujen päästö- ja poistumaskenaariot vuoteen 2050) -hanke tavoitteena päivittää osa skenaariolaskelmista siten, että hallitusohjelman mukainen hiilineutraalisuustavoite toteutuu. PITKO-jatkohanke toteutettiin työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) toimeksiannosta yhteistyössä VTT:n, Syken ja Merit Economics:n kanssa. MALUSEPO-hanke toteutettiin puolestaan maa- ja metsätalousministeriön (MMM) toimeksiannosta ja sen toteutti Luke. Tässä raportissa on esitetty päivitettyjen skenaariotarkastelujen lähtökohdat siltä osin, kun ne poikkeavat PITKO:n tai MALULU-hankkeen lähtökohdista. Lisäksi on esitetty uusien skenaariolaskelmien keskeiset tulokset, laadullinen analyysi merkittävimmistä riskeistä ja johtopäätökset hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisesta.

Raportissa esitettyjen laskennallisten ja laadullisten analyysien tuloksia on hyödynnetty komissiolle lähetettävän pitkän aikavälin strategian (Long Term Strategy I. LTS) laadinnassa. Euroopan Unionin (EU) puhtaan energian pakettiin kuuluvan hallintomalliasetuksen (EU 2018) mukaan kunkin jäsenvaltion on toimitettava vähintään 30 vuotta kattava pitkän aikavälin strategiansa. Alkuvuonna 2020 toimitettava ensimmäinen strategia ulottuu vuoteen 2050 asti. LTS:n tulee sisältää ne toimet,

joilla saavutetaan Yhdistyneiden kansakuntien ilmastopimuksen (UNFCCC), Pariisin sopimuksen ja EU:n asettamat ilmastotavoitteet. Näistä keskeisiä ovat kasvihuonekaasu (KHK) -päästöjen rajoittaminen ja hiilidioksidia ilmakehästä poistavien nielujen vahvistaminen maapallon keskilämpötilan nousun hillitsemiseksi selvästi alle kahteen celsiusasteeseen, pyrkien 1,5 celsiusasteeseen.

PITKO-hankkeessa kokonaispäästötarkastelut perustuivat neljän vaihtoehdoisen skenaarion laskennallisiin ja laadullisiin analyyseihin. Nämä skenaariot olivat nimeltään *Jatkuva kasvu*, *Säästö*, *Muutos* ja *Pysähdys*. Näiden lisäksi laadittiin myös EU-80%-skenaario, joka oli vertailukelpoinen perusskenaarioon (WEM) nähden. PITKO-jatko- ja MALUSEPO-hankkeissa tarkastelut rajattiin WEM-, Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaarioiden päivittämiseen siten, että laskelmissa on hyödynnetty uusinta tilastollista ja muuta tietoa. Esimerkiksi LULUCF-sektorin metsänielujen laskennassa Luke on käyttänyt tuoreempaa valtakunnan metsien inventointitietoa (VMI11/12), joka on vuosilta 2013–2017, kun taas MALULU:ssa käytetty inventointitieto oli peräisin vuosilta 2009–2013. Merkittävin muutos skenaarioissa kuitenkin liittyy hallitusohjelman linjauksiin mukaan lukien Suomen hiilineutraalisuustavoite vuonna 2035, johon kytkeytyy myös muun muassa linjaus turpeen käytön puolituksesta vuoteen 2030 mennessä, biokaasun käytön edistäminen ja energiaverouudistus. Toisin kuin PITKO- ja MALULU-hankkeissa kaikki laskelmat on nyt tehty integroidusti, eli VTT:n, Luken ja Merit Economics:n skenaariolaskennat käyttävät samaa lähtöaineistoa ja eri malleilla saadut laskennalliset tulokset ovat soveltuvin osin toisen laskentamallin lähtöaineistona.

Raportissa on esitetty yhteenveto keskeisistä lähtötiedoista ja tuloksista. Luvussa 2 on taustoitettu hiilineutraalisuuden ja laskelmien lähtökohtana olevien KHK-päästötavoitteiden määrittelyitä. Luvussa 3 on esitetty tarkasteluissa käytetyt mallinnusmenetelmät ja lähdeaineistot. Laskelmissa käytettyjä eri skenaarioiden keskeisiä lähtötietoja on esitelty luvussa 4 erityisesti siltä osin, kun ne ovat muuttuneet aiempiin laskelmiin nähden. Luvuissa 5–8 on esitetty WEM-, Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaarioiden laskennalliset tulokset mukaan lukien hiilineutraalisuustavoitteen vaikutukset Suomen KHK-päästöihin (luvut 5–7) ja -poistumiin (luku 6), energiataloutteen (luku 7) ja kansantalouteen (luku 8). Luvussa 9 on esitetty laadullinen analyysi ympäristövaikutuksista ja riskeistä. Luku 10 tarkastelee hiilineutraalisuustavoitetta kokonaisuutena ja esittää arvioita tarvittavista ohjaustoimista perustuen PITKO-jatko- ja MALUSEPO-analyyseihin ja vaikutusarvioihin. Luvussa 11 esitetään lopuksi johtopäätökset.

2. Hiilineutraaliuden ja päästötavoitteen määrittelyt

Sampo Soimakallio (Syke)

Pariisin ilmastopimuksessa pyritään saavuttamaan globaalisti tila, jossa ihmisperäiset kasvihuonekaasupäästöt ja ihmistoimin aikaansaadut nielut ovat tasapainossa maiden yhteiset, mutta erilaiset vastuut huomioiden. On kuitenkin tulkinnanvaraista, mikä osuus ihmistoimin vahvistettavasta biosfääriin tai merten luonnollisesta nielusta on ihmistoimin aikaansaatu (Fuglesvedt et al. 2018). Asiaa on käsitelty tätä raporttia tarkemmin mm. PITKO-hankkeen loppuraportissa (Koljonen et al. 2019a) ja Suomen ilmastopaneelin raportissa (Seppälä et al. 2019b).

Vuosia 2021–2030 koskevassa EU:n LULUCF-asetuksessa hoidetun metsämaan nielulle määritetään niin sanotun vertailutason kautta taso, jonka ylimenevältä osalta nielu voidaan rajoitetusti laskea hyväksi maankäyttösektorin nettonollapäästövelvoitetta täyettäessä. Mikäli maankäyttösektori on laskennallisesti nettonielu, voidaan nielua hyödyntää tietyin ehdoin rajoitetusti jäsenmaakohtaisen taakanjakosektorin päästövelvoitteiden täyttämiseksi. Metsien vertailutasojen asettamisprosessi on edelleen kesken ja vertailutasot on määrä vahvistaa vuoden 2020 aikana. Ei ole tiedossa, minkälaista laskentaa metsien hiilinieluille sovelletaan vuoden 2030 jälkeen.

Kuten luvussa 1 esitettiin hallitusohjelman (VN 2019) mukaan Suomi on hiilineutraali vuonna 2035 ja hiilinegatiivinen nopeasti sen jälkeen, mikä toteutetaan nopeuttamalla päästövähennystoimia ja vahvistamalla hiilinieluja. Hiilineutraaliuden määrittelyn puutteen lisäksi hallitusohjelmassa ei myöskään ole määritelty, onko hiilineutraalius tarkoitus saavuttaa pelkästään Suomen alueellisena taseena vai voidaan hyväksi lukea myös Suomen alueen ulkopuolella tuotettavia laskennallisia päästövähennysyksiköitä tai nieluja.

Monissa yhteyksissä käytetty termi hiilineutraalius tarkoittaa sitä, että hiilidioksidi vapautuu ilmakehään yhtä paljon kuin sitä sieltä poistuu (van Soest et al. 2018). Pariisin ilmastopimuksen tasapaino päästöjen ja nielujen välillä tarkoittaa kuitenkin kaikkia kasvihuonekaasuja, joten sopivampi termi tasapainolle olisi kasvihuonekaasuneutraalius. Eri kasvihuonekaasuilla on erilainen elinikä ja ominaissäteilypakote ilmakehässä. Toistaiseksi ilmastopolitiikassa raportoitavien kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutus on suhteutettu hiilidioksidiin käyttämällä sadan vuoden kumulatiivista säteilypakotetta, eli niin sanottuja GWP-kertoimia (Global warming potential) (IPCC 2019). Hiilineutraalius tai kasvihuonekaasuneutraalius voidaan määrittellä tarkoittavan GWP-kertoimilla painotettua hiilidioksidiekvivalentteina mitattua päästöjen ja nielujen vuotuista nollatasetta. Joissakin yhteyksissä tästä käytetään termiä ilmastoneutraalius, joka kuitenkin luonnontieteellisesti viittaa siihen, että kasvihuonekaasupäästöjen ja muiden ilmastoa lämmittävien tai viilentävien tekijöiden, kuten albedon, aerosolien ja nielujen yhteenlaskettu säteilypakote on tiettyinä aikavälinä nolla.

Tässä raportissa termillä *hiilineutraalius* viitataan yllä määriteltyyn kasvihuonekaasuneutraaliuteen tyypillisen käytännön mukaisesti (van Soest et al. 2018). PITKO-jatko ja MALUSEPO-hankkeiden ohjausryhmän päätöksellä sovittiin, että hiilineutraaliustarkasteluissa lähtökohtana on Suomen alueellisten kasvihuonekaasujen päästöjen ja nieluilla aikaansaattujen poistumien tasapaino. Nieluihin laskeetaan mukaan kaikki maankäyttösektorilla (LULUCF) raportoitavat metsien, maaperän ja puutuotteiden poistumat ja teknisin keinoin, esimerkiksi bioenergiaan kytketyn hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin avulla aikaansaadut poistumat (l. BECCS).

Vuoden 2050 tavoitteena tarkasteltiin 87,5 %:n (*Jatkuva kasvu*) ja 90 %:n (*Säästö*) päästövähennyksiä (pl. maankäyttösektori) vuoden 1990 tasoon verrattuna, kuten PITKO-hankkeessa. Vuoden 2035 jälkeiselle hiilnegatiivisuudelle ei siten asetettu määrällistä tavoitetta, vaan sen suuruuden annettiin määräytyä maankäyttösektorin nettonielun tasosta riippuen.

3. Laskentamenetelmät ja lähdeaineistot

3.1 Kuvaus TIMES-VTT-mallista ja sen tietokannasta

Antti Lehtilä (VTT)

Skenaarioiden mallinnuksessa ja analysoinnissa käytetty keskeinen työkalu on VTT:llä kehitetty laaja järjestelmämalli: TIMES-VTT, joka kattaa koko maailman energian tuotannon ja kulutuksen sekä kasvihuonekaasupäästöt. Malli perustuu kansainvälisessä yhteistyössä kehitettyyn globaaliin ETSAP TIAM-malliin (Loulou 2008, Loulou & Labriet 2008), joka pohjautuu puolestaan IEA ETSAP TIMES-mallinnusjärjestelmään (Loulou et al 2016). TIMES-VTT-mallissa on kuvattu Suomen, Pohjoismaiden ja muun Euroopan energiajärjestelmät. Menetelmällisesti malli on niin sanottu osittaistasapainomalli, joka maksimoi kuluttajien ja tuottajien yhteenlaskettua taloudellista ylijäämää. Malli sisältää yksityiskohtaisen kuvauksen sekä energian tuotannon ja käytön nykyjärjestelmästä että tulevaisuuden teknologioista monina eri investointivaihtoehtoina.

TIMES-VTT-mallin laaja tietokanta sisältää yksityiskohtaisen kuvauksen nykyisestä energiajärjestelmästä mukaan lukien energiantuotanto ja -siirtojärjestelmä, rakennuskanta, asumisen ja palvelujen energian käyttökohteet, autokanta ja muu liikennevälinekanta, energiaintensiivisten teollisuustuotteiden tuotantoprosessit ja -laitokset, muun teollisuuden energian loppukäyttökohteet sekä maa- ja metsätalouden energiakäyttö. Mallin tietokanta sisältää myös arviot nykyisen energiajärjestelmän poistumasta, kuten energiantuotantolaitosten, rakennusten ja autokannan poistumasta. Tietokannan laajin osa koostuu kuitenkin luonnollisesti tulevaisuuden energiajärjestelmän investointivaihtoehtojen teknologiakuvauksista, mukaan lukien arviot niiden kustannusten ja teknisen suorituskyvyn kehityksistä (mm. energiantuotannon hyötysuhteet, käyttöikä, käytettävyyttä). Lisäksi mallissa on kuvattu alueelliset energiahyödykkeiden tekniset potentiaalit, polttoaineiden globaali kauppa, päästökauppa (ml. CO₂:n kuljetus- ja varastointipalvelujen kauppa). TIMES-VTT-mallia ja sen tietokantoja on kuvattu useissa tieteellisissä artikkeleissa (Koljonen et al. 2009, Koljonen & Lehtilä 2015, Lehtilä & Koljonen 2018).

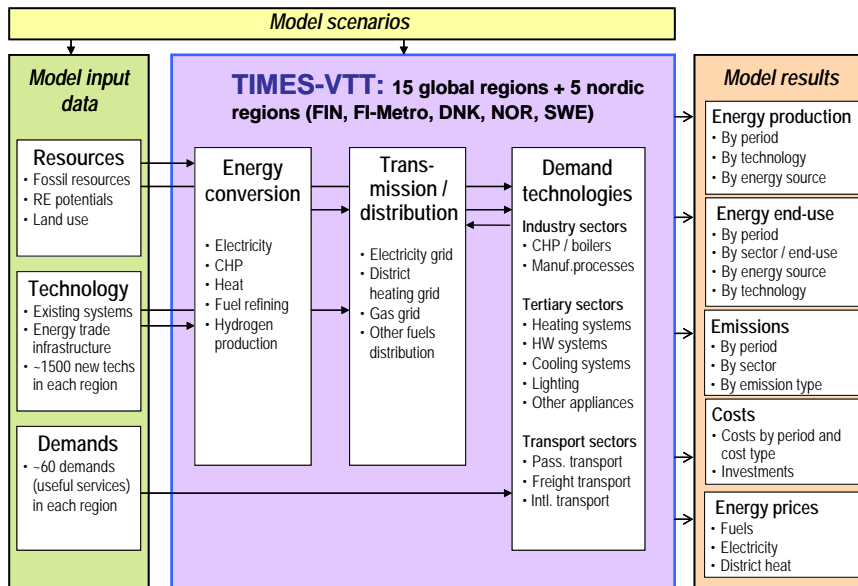
Energiajärjestelmämallin ratkaisu perustuu tuottajien ja kuluttajien ylijäämän maksimointiin, ja tuloksena saatu energian hankinta- ja loppukäyttöjärjestelmä tyydyttää siten hyötyenergian kysynnän mahdollisimman kustannustehokkaasti, ottaen huomioon muun muassa talouden eri sektoreiden toimijoille kohdistuvat verot, tuet ja investointien tuottovaatimukset. Lisäksi mallissa voidaan asettaa järjestelmän kehitykselle monenlaisia rajoitteita. Esimerkiksi useille energian tuotantomuodoille on asetettu tuotannon, kapasiteetin tai markkinaosuuden ylä- tai alarajoja, joita ratkaisun täytyy noudattaa. Energian kulutusta ja tuotantoa tarkastellaan mallissa yhteinäisin periaattein, jolloin energian käytön tehostusmahdollisuuksien ja tuotantoinvestointien keskinäinen vuorovaikutus tulee otetuksi huomioon.

TIMES-VTT-mallissa on kuvattuna kaikki Kioton pöytäkirjan kasvihuonekaasupäästöt ja niiden vähennysteknologiat ja/tai menetelmät. Näin ollen vähäpäästöskenaariotarkasteluissa päästövähennykset toteutetaan kaikilla KHK-päästöjä tuottavilla sektoreilla (pois lukien LULUCF-sektori) kustannusjärjestyksessä. Taakanjakosektorin päästöille asetettu päästökatto on myös esimerkki skenaarioille asetuista rajoitteista. Energian kulutusta ja tuotantoa tarkastellaan mallissa samoin periaattein, jolloin energian käytön tehostusmahdollisuuksien ja tuotantoinvestointien keskinäinen vuorovaikutus tulee otetuksi huomioon.

TIMES-VTT-mallin laskema energian kulutus ja päästöjen kehitys riippuvat monista lähtötietoina annetuista tekijöistä. Keskeisiä mallin käyttämiä lähtötietoja ovat:

- talouden eri sektoreiden kehitys eli teollisuussektoreiden, kotitalouksien, palvelujen, maa- ja metsätalouden ja kaivannaisteollisuuden kehitys;
- energiantensiivisen teollisuuden toimialojen eri tuotteiden tuotannon kehitys;
- nykyinen autokanta ja muu liikennevälinekanta sekä liikkumis- ja kuljetustarpeiden kehitys liikennemuodoittain;
- nykyinen rakennuskanta sekä asuinpinta-alan kehitys rakennustyypeittäin;
- nykyiset energia- ja ilmastopoliittiset ohjaukset ml. energia- ja päästöverot, tuet, päätetyt energian käytön tehostamista koskevat määräykset, säädökset jne.;
- nykyisen energijärjestelmän laitos- ja laitekannan laskennallinen poistuma ja käytettävissä olevien teknologiavaihtoehtojen oletettu kehitys kaikilla sektoreilla sekä teknisten parametrien että kustannusten osalta.

Energiajärjestelmämallin tuloksena saadaan sellaisen energian hankinta- ja loppukäyttöjärjestelmän kehitys, jolla hyötyenergian kysyntä voidaan tyydyttää mahdollisimman kustannustehokkaasti, ottaen huomioon muun muassa talouden eri sektoreiden toimijoille kohdistuvat verot, tuet ja investointien tuottovaatimukset. Mallin tuottamat tulokset käsittävät kaikkien mallissa kuvattujen energiahyödykkeiden, materiaalien ja päästöjen virrat kunakin vuonna tuotannosta, tuonnista ja varastoista loppukulutukseen, vientiin, varastointiin, loppusijoitukseen tai kierrätykseen. Kasvihuonekaasupäästöjen määrät saadaan tuloksista eriteltyä sektoreittain ja päästölajeittain tarvittaessa prosesseittain. Tulokset sisältävät myös muun muassa kaikkien mallissa kuvattujen tuotantolaitosten ja tekniikoiden kapasiteetit, investointikustannukset ja käyttökustannukset. Malli tuottaa tuloksenaan myös energiahyödykkeiden hinnat, jotka edustavat pitkän aikavälin tasapainohintoja.



Kuva 1. TIMES-mallin komponentit ja yksinkertaistettu yhden alueen rakennekaavio. Alueiden välillä on kuvattu tärkeimpien energiahyödykkeiden kauppa.

TIMES-VTT-mallin tarkasteluajaväli voidaan valita vapaasti aina vuoteen 2150 saakka, mutta tarkastelun lähtövuotena on mallin nykyisessä versiossa 2010. Malli on kalibroitu kaikkien maiden osalta IEA:n (International Energy Agency) yksityiskohtaisiin energiataseisiin vuosina 2010 ja 2015. Suomen osalta ne perustuvat Tilastokeskuksen IEA:lle toimittamiin tilastoihin, mutta ovat laskentatavaltaan hieman kansallisesta energiatilastoinnista poikkeavia.

3.2 Rakennuskannan energiankulutuksen REMA-malli

Rakennuskannan energialaskennassa on hyödynnetty VTT:llä kehitettyä REMA-mallia. REMA on rakennuskannan energiankulutuksen bottom-up -tyyppinen laskentamalli, joka perustuu edustavien tyyppirakennusten käytölle. Energiankulutuksen tulevan kehityksen laskennan lähtökohtana ovat uudisrakentamisen, korjausrakentamisen ja vuosittaisen poistuman ennakoitua määrää käyttötarkoituksen ja iän mukaisessa luokassa. Koko rakennuskanta on jaoteltu mallissa seuraaviin käyttötarkoituksiin:

- omakotitalot
- rivi- ja asuinkerrostalot
- palvelurakennukset
- kesämökit.

Näistä palvelurakennukset sisältävät seuraavat Tilastokeskuksen käyttämät rakennustyyppit: liikerakennukset, toimistorakennukset, liikenteen rakennukset, hoitoalan rakennukset, kokoontumisrakennukset ja opetusrakennukset. Kunkin käyttötarkoituksen mukainen rakennuskanta on edelleen jaettu ikäluokkiin rakentamisajan mukaan. Ikäluokkia määritettäessä on pyritty ottamaan huomioon energiatehokkuusvaatimusten kehitys:

- ennen vuotta 1959 rakennetut
- 1960–1979 rakennetut
- 1980–2009 rakennetut
- 2010–2018 rakennetut
- 2019–2024 ennakoitu rakentaminen
- 2025–2050 ennakoitu rakentaminen

Jokaisesta rakennusluokasta on mallinnettu tilojen lämmitykseen kuluva energia eriteltynä ilmanvaihdosta ja vaipasta (U-arvo ja tiiveys) johtuviin lämpöhäviöihin. Lämmityksen lisäksi laskennassa on mukana lämpimän käyttöveden tuottamisen energiatarve sekä kiinteistö sähkö ja käyttäjien kuluttama muu sähkö.

REMA-mallissa tyyppirakennusten energiankulutukset voidaan johtaa tilastotiedoista, arvioida tai saada simuloituista rakennuksista. Tässä tapauksessa nojaututtiin olemassa olevan rakennuskannan osalta Tilastokeskuksen (2018) sekä aiempien tutkimusten (mm. Tuominen et al. 2012 ja Tuominen et al. 2013) tietoihin ja uusien rakennusten osalta Suomen Ympäristökeskuksen julkaisemaan rakennusten energiankulutuksen perusskenaarioon (Mattinen et al. 2016). Näin muodostetusta perusskenaariosta on saatu muut skenaariot muuntelemalla niitä skenaarion taustatarinaan sopivaksi. Tarkempi kuvaus REMA-mallista on julkisesti saatavilla (Tuominen et al. 2014).

3.3 Maatalouden osittaistasapainomalli DREMFIA

Heikki Lehtonen (Luke)

DREMFIA (Dynamic multiRegional sector Model of Finnish Agriculture; Lehtonen 2001, 2015) on Suomen maatalouden päätuotantosunnat, pellonkäytön, kotimaisen kysynnän ja ulkomaankaupan kattava taloudellinen osittaistasapainomalli, jossa on 4 suuraluetta: Etelä-Suomi, Sisä-Suomi, Pohjanmaa ja Pohjois-Suomi (Lehtonen 2015). Suuralueet jakautuvat pienempiin tuotannollisiin alueisiin tukivyöhykejaon mukaisesti. Näin saavutetaan varsin tarkka tukipolitiikan kuvaus. Poro-, hevos- ja lammastaloutta ei ole DREMFIA-mallissa mukana ja näiden eläinten määrien on oletettu maatalouden skenaariotarkasteluissa pysyvän lähellä 2018 tasoa vuoteen 2050. Myöskään turkistarhausta ja puutarhataloutta ei ole mallissa mukana. Malli kuitenkin kattaa yli 95 % maatalousmaan käytöstä.

Suomen maatalouden rakennekehitys on mallinnettu endogeenisesti niin, että lypsylehmien lukumäärän havaittu kasvu suurimmissa tilakokoluokissa ja tärkeimmillä tuotantoalueilla Suomessa toteutuu ja otetaan pellonkäytössä huomioon. Malli

on validoitu siten, että vuosien 1995–2018 toteutunut kehitys kotieläintuotannon kokonaismäärissä ja pellonkäytössä likimain toteutuu. Samalla huomioidaan Suomessa tuotettujen maataloustuotteiden kulutus kotimaassa yhtä aikaa tuonnin ja viennin muutosten kanssa. Kotimainen kulutus voidaan tyydyttää kotimaisella tuotannolla tai kilpailevilla tuontituotteilla. Kulutus noudattaa vuosina 1995–2018 toteutunutta kehitystä ja vuoden 2018 kulutusta vuosina 2019–2050, ellei erillisissä skenaarioissa toisin määritellä, kuten tehdään jäljempänä.

Suomi on oletettu mallissa täysin riippuvaiseksi EU- ja globaalilla tasolla muodostuvista panos- ja tuotehinnoista. Kotimaisten maataloustuotteiden hintataso voi kuitenkin vähäisessä määrin poiketa EU:n keskihinnoista. Tuotekohtaiset hintapoikkeamat esimerkiksi maidon ja lihan tuottajahinnoissa toteutuvat mallissa siten, että kotimaiset ja ulkomaiset tuotteet ovat epätäydellisiä substituutteja. Ne voivat siten korvata toisiaan varsin pitkälle, mutta kuitenkin rajallisesti ollen laadullisesti erilaisia. Esimerkiksi Suomeen tuodaan ja Suomesta viedään osin erilaista lihaa (eri ruhonosia) ja eri maitotuotteita (joita mallissa mukana yhteensä 18 erilaista).

Eläinten rehunkulutus voi muuttua hintasuhteiden ohjaamana ruokintasuositusten antamisissa puitteissa eri tuotostasoille. Eläintuotanto vaikuttaa vahvasti rehun tuotantoon ja pellonkäyttöön. Eri kasvien pinta-alojen kehitykseen vaikuttavat myös lannoitteiden ja maataloustuotteiden hinnat sekä maataloustuet. Näin ollen DREMFIAMalli toistaa pääpiirteissään 1995–2018 kehityksen Suomen maatalouden tuotannossa ja maankäytössä ja sisältää keskeiset tarvittavat muuttujat arvioitaessa maatalouden kehitysuria ja maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen kehitystä vuoteen 2050.

Maatalouden kehitysura sisältää vuosittaisen kehityksen vuoteen 2050. Malli on alun perin suunniteltu ja toteutettu siten, että sen avulla on mahdollista arvioida erityisesti CAP:in (Common Agricultural Policy) mukaiset maataloustuet tukiehtoineen ja Suomen kansallisten maatalouspoliittisten toimenpiteiden vaikutusta maataloustuotannon määrään, sijoittumiseen ja maataloustuloon Suomessa. Viimeisin tähän liittyvä julkaistu tutkimus on Lehtonen & Niemi (2018) julkaisema. DREMFIAMallia on sovellettu myös arvioitaessa markkinamuutosten, ympäristötukijärjestelmän (Lehtonen & Rankinen 2015) ja muuttuvan ilmaston vaikutuksia maatalouden tuotantoon, pellonkäyttöön ja tuloihin (Lehtonen 2015). Tilastokeskuksen väkilukuenusteet (Tilastokeskus 2015) ja energian ennustettu hintakehitys vuosisadan puoliväliin asti huomioidaan DREMFIAMallinnuksessa, joka tuottaa tarvittavan syötteen kasvihuonekaasulaskentaan, jossa huomioidaan myös porojen, lampaiden ja hevosten sekä turkiseläinten lukumäärät.

DREMFIAMallin on mahdollista sisällyttää eri skenaarioissa määriteltyjä muutoksia kasvien sadoissa, maatalouden tuottavuudessa, panoskäytössä ja maataloustuotteiden sekä maatalouden lopputuotteiden ja panoshintojen EU-hinnoissa. Esimerkiksi lannoitevero, jota nykyisin ei ole asetettu, mutta voidaan määrittää erillisissä skenaarioissa, vaikuttaa mallissa suoraan kasvin lannoitusta ja satotasoa vähentävästi. Lannoitevero ja mahdolliset uudet tai muita tukia korvaavat maataloustuet matalan lannoitustason nurmille kannustavat tyyppiä sitovien apilanurmi-seosten käyttöön. Tämä toteutuu mallissa siten, että voimakkaaseen epäorgaan-

seen typpilannoitukseen perustuvan säilörehunurmen tuotanto vähenee ja korvautuu osittain matalamman lannoituksen ja satotason nurmituotannolla (Lehtonen & Niskanen 2016). Biokaasutuotannon vaikutukset kotieläintuotantoon voidaan ottaa huomioon olettamalla pieni energiakustannusten väheneminen kotieläintaloudessa, mutta tarkempi panoskäytön muutos jää toistaiseksi huomioimatta, koska malliin ei ole määritelty biokaasutuotantoa yksityiskohtineen.

DREMFA tuottaa tässä tutkimuksessa kasvihuonekaasulaskennan lähtötiedoiksi väkilannoituksen typpimäärän, pellonkäytön ja eläinmäärät tärkeimmille eläinluokille. Eläinten paino, typeneritys ja maidontuotanto kehittyvät kasvihuonekaasuinventaariossa raportoidun kehityksen mukaan myös tulevaisuudessa.

3.4 Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous - sektorin laskenta

Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous (LULUCF) -sektorin skenaariot muodostuvat kullekin maankäyttöluokalle ja puutuotteille erikseen lasketuista skenaarioista. Skenaarioiden laadinta jakautuu neljään osaan. Ensimmäisessä vaiheessa muodostetaan maankäyttöluokkien ja maankäytön muutosluokkien pinta-alojen kehitysskenaariot; pinta-alat ovat LULUCF-laskennan keskeinen lähtötieto. Metsien kehitysskenaariot, ja niissä lähinnä puuston kehitys, muodostivat oman kokonaisuutensa. Puutuotteiden tuotantoskenaariot muodostettiin TIMES-VTT-mallilla (ks. luku 4.2.1) ja mallin tuloksia käytettiin lähtötietona puutuotteiden hiilivaras-ton muutosten laskennassa. Neljännen kokonaisuuden muodostivat muut maankäyttöluokat kuin metsämaa, ja maankäytön muutosluokat.

3.4.1 Maankäytön ja maankäytön muutosten pinta-alojen määrittäminen

Markus Haakana ja Tarja Tuomainen (Luke)

LULUCF-sektorin päästöt ja poistumat laskettiin kuudessa maankäyttöluokassa, jotka kattavat Suomen maa-alan ja sisävedet. Merivedet jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Maankäytön muutospinta-alat estimoitiin Haakanan et al. (2015) esittämällä menetelmällä kuhunkin skenaarioon liittyvät taustaoletukset huomioiden esimerkiksi tuulivoimapuistojen rakentamisesta tai pellon metsityksestä (Kärkkäinen et al. 2019). Maankäytön muutosskenaarioiden taustalla ovat tapahtuneista maankäytön muutoksista lasketut trendit ja keskiarvot vuotuisista muutospinta-aloista. Näitä on täydennetty kunkin skenaarion päivitettyillä oletuksilla. Historiatieto on sama, jota käytettiin MALULU-hankkeessa (Aakkula et al. 2019). Lisäksi päästölaskennoissa käytettiin viimeisimmän Suomen kasvihuonekaasuinventaarion pinta-alatietoja (Tilastokeskus 2019). Suomen maa-alan ja sisävesien yhteenlasketun pinta-alan oletettiin pysyvän vakiona 33,8 miljoonassa hehtaarissa vuoteen 2050. Vakioitua kokonaispinta-alaa käytetään myös KHK-inventaariossa, vaikka tiedetään, että muu-tosta tapahtuu merivedestä maaksi. Vakiopinta-alan käytöllä ei ole skenaarioissa suurta merkitystä.

Historiatiedon ja lasketun trendin lisäksi rakennetun maan kehitystä eri skenaarioissa ohjasivat TIMES-VTT -mallin laskennalliset arviot aurinkovoiman ja tuulivoiman kehittämisestä eri skenaarioissa sekä liikenneväylien osalta jo päätetyt rautatiehankkeet. Yhden tuulivoimalan vaatimaksi alaksi arvioitiin 2 hehtaaria keskimääräisellä 2–5 MW:n voimalakoolla (Niemi 2019, Mikkonen 2019). Yhden maalle rakennettavan TWh:n aurinkovoimalan vaatimaksi pinta-alaksi arvioitiin 1 000 ha, jolla tuotantoluvut muunnettiin hehtaareiksi (Lehtilä 2019). Rakennuskannan kehittämisen vaikutus maankäyttöön eri skenaarioissa johdettiin luvussa 4.5 esitetyistä kehityksistä (Kuva 11 ja 12).

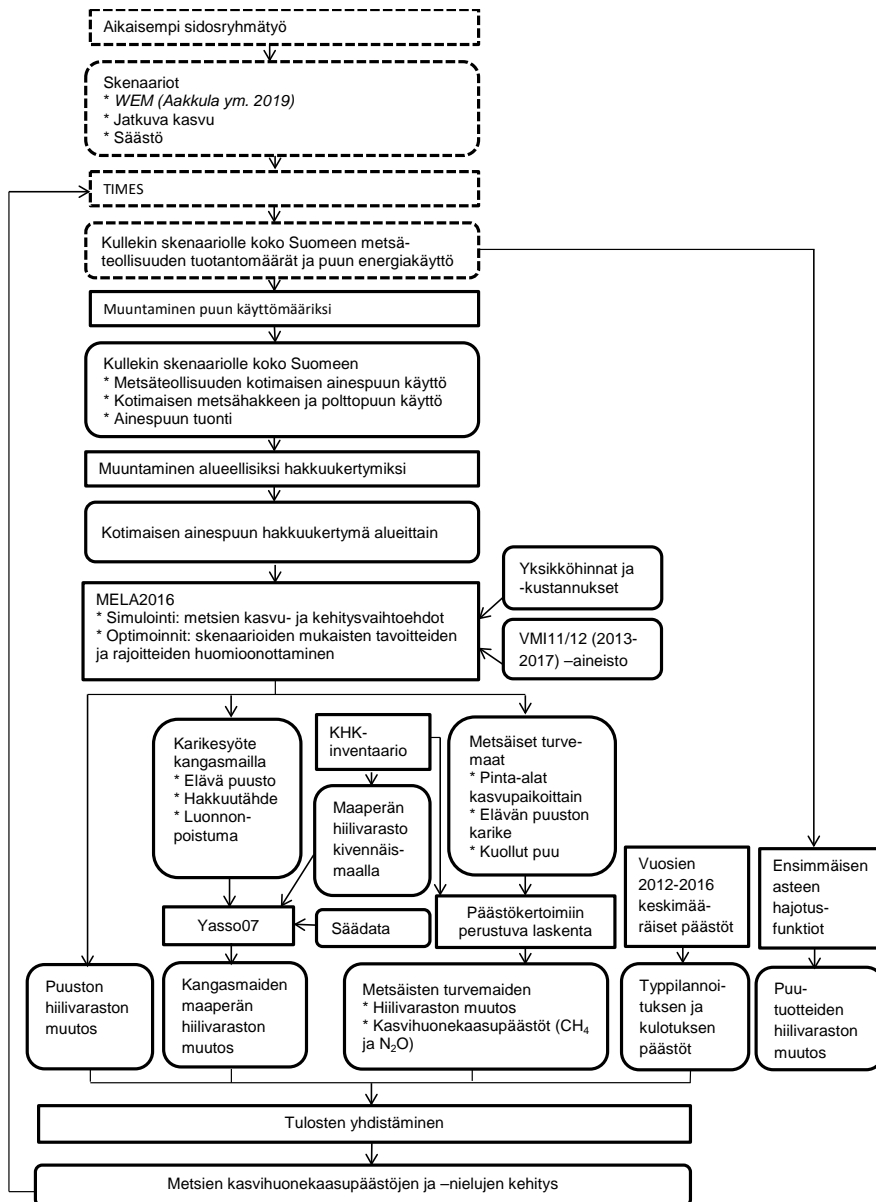
Energiaturpeen tuotannon oletettiin kehittyvän TIMES-VTT -mallin tuottaman turpeen energiatuotannon (PJ/v) mukaisesti eri skenaariovaihtoehdoissa. Energiantuotantoa vastaava tuotantoala saatiin skaalaamalla tunnetut pinta-alat ja energiankäyttö. Ympäristöturpeen tuotannon oletettiin pysyvän nykyisellä tasolla.

LULUCF:n Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaariot sisältävät oletukset bioenergia-kasvien viljelyalan kasvusta ja toisaalta viljelysmaan pinta-alan voimakkaan pieneenemisen. Tästä johtuen viljelysmaita siirtyy WEM-skenaariota enemmän metsämaaksi tai ruohikkoalueiksi.

3.4.2 Metsävarojen kehityksen mallinnus MELA-ohjelmistolla

Hannu Hirvelä, Harri Kilpeläinen, Leena Kärkkäinen ja Juha Laitila (Luke)

Eri skenaarioiden kotimaisen ainespuun, metsähakkeen ja polttopuun käyttöä vastaavat hakkuuprojektit sekä niille ehdollinen metsävarojen kehitys (puuston tilavuus, biomassa, kasvu) ja poistuma (hakkuu- ja luonnonpoistuma) laskettiin Luken MELA2016-ohjelmistolla (Hirvelä et al. 2017). MELA-laskelmien tuloksia käytettiin kangasmaiden maaperän ja metsäisten turvemaiden hiilivaraston muutoksen arvioinnissa (Kuva 2 ja luku 3.4.3). WEM-skenaariossa aines- ja energiapuunkäyttöä vastaavat alueelliset hakkuukertymätavoitteet määritettiin Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050 -raporttia (Aakkula et al. 2019) varten laaditun LULUCF-WEM-skenaariion mukaisesti. Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaarioiden TIMES-VTT-mallilla (ks. luku 3.1) lasketut metsäteollisuuden tuotantomäärät (ks. luku 4.2.1) muutettiin kertoimien avulla metsäteollisuuden puunkäyttömääräksi liitteessä A kuvatulla tavalla. Käyttömääriä arvioitaessa otettiin huomioon ainespuun tuonti. Nämä Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaarioiden mukaiset kotimaisen aines- ja energiapuun käyttömäärät muunnettiin edelleen alueellisiksi hakkuukertymiksi, joita käytettiin MELA-hakkuuprojektien laskennassa.



Kuva 2. Laskennan vaiheet metsien KHK-päästöjen ja -poistumien kehityksen enustamiseksi.

Projektioiden lähtötilanteen metsävaratietona oli valtakunnan metsien 11. ja 12. inventoinnin maastoaineisto mittausvuosilta 2013–2017 (poikkeuksena Ylä-Lapissa VMI11-aineistossa mittausvuodet 2012–2013) (Valtakunnan metsien... 2013 ja

2017). Metsä- ja kitumaan koealoihin perustuvia laskentakuvioita oli yhteensä 58 074. Laskentakuviot jaettiin kolmeen käsittelyluokkaan: ensisijaisesti puuntuotannossa, rajoitetussa puuntuotannossa ja puuntuotannon ulkopuolella oleviin. Laskentakuvion käsittelyluokka rajaa kohteelle sallitut metsikkökohtaiset hakkuu- ja metsänhoitotoimenpiteet (Liite B). Metsävaroja koskevat tulokset kattavat kaikki kolme luokkaa yhteensä, vaikka puuntuotannon ulkopuolisille alueille ei kohdistettu toimenpiteitä.

MELA-metsikkösimulaattori tuotti jokaiselle laskentakuvioille automaattisesti joukon vaihtoehtoisia kehityspolkuja, jotka koostuivat luonnonprosesseista (puiden synty, kasvu ja kuoleminen), hakkuista ja metsänhoitotöistä. Metsien käsittely noudatti kaikissa skenaarioissa Tapion metsänhoidon suosituksia (Äijälä et al. 2014, Koistinen et al. 2016). Metsiköiden kehityspolkujen tuottaminen MELA2016-ohjelmistolla on kuvattu tarkemmin liitteessä B.

Hakkuuprojektiot määritettiin alueittaisissa optimointilaskelmissa, joissa tavoite-
muuttujana oli puuntuotannon taloudellisen tuloksen maksimointi neljän prosentin tuottovaatimuksella ja rajoitteena kullekin skenaariorille määritetyt puutavaralajikohtaiset hakkuukertymätaavoitteet. Puuntuotannon taloudellinen tulos laskettiin ainespuulle tienvarsihintoihin perustuen ja energiapuulle sovellettiin käyttöpisteessä hakkeelle maksettua hintaa. Tienvarsihinnat saatiin lisäämällä tilastoituihin kantohintoihin keskimääräiset toteutuneet korjuukustannukset. Metsähakkeen käyttöpistehinnat noudattivat tilastoituja keskihintoja. Kustannusten laskenta perustui työläjien tilastoituihin yksikköhintoihin ja tuottavuusmallien mukaisesti ajanmenekkeihin, jotka ottivat huomioon esim. korjuussa olosuhteiden vaikutuksen (poistettavien puiden järeys, hehtaarikohtainen poistuma ja jätettävän puuston määrä ja maaperä). Skenaariolaskelmissa käytetyt hinta- ja kustannustiedot on esitetty liitteessä B.

MELA-ohjelmistossa puun pohjapinta-alan kasvumalli on kalibroitu VMI11-aineiston läpimitan kasvunmittausten perusteella, jotka ennen kalibroitua oli indeksi-korjattu vuosien 1984–2013 keskimääräiseen kasvun tasoon. Lisäksi MELA-ohjelmiston tuottamaa tilavuuskasvun arviota tarkennettiin skenaarioissa ottamalla huomioon kalibroitajakson keskivuodesta 1999 vuoteen 2017 tapahtunut keskilämpötilan ja ilman hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus puuston kasvuun (ks. liite B). Tilavuuskasvuvarvion laadinnassa käytettiin samaa menetelmää kuin Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050 -raportissa (Aakkula et al. 2019).

Tämän raportin WEM-skenaarion oletukset metsätalouden ja sen toimintaympäristön kehityksestä olivat samat kuin Aakkulan et al. (2019) LULUCF-WEM-skenaariossa. Tässä esitetyt MALUSEPO-laskelmat poikkesivat kuitenkin Aakkula et al. (2019) raportissa kuvatuista MALULU-laskelmista mm. laskenta-aineiston sekä hinta- ja kustannustietojen ajantasaisuuden, metsikkötason käsittelyiden simuloinnin ja hakkuutähteen laskennan osalta. MELA-ohjelmistolla laadittujen MALULU- ja MALUSEPO-laskelmien välisiä eroja on kuvattu tarkemmin liitteessä D.

3.4.3 LULUCF-sektorin päästöjen ja poistumien laskenta

Paula Ollila ja Tarja Tuomainen (Luke)

Skenaarioiden kasvihuonekaasujen päästöt ja poistumat pyrittiin laskemaan mahdollisimman yhdenmukaisesti Suomen kasvihuonekaasuinventaarion (KHK-inventaario) luokitusten ja menetelmien kanssa (Tilastokeskus 2019). Inventaarion luokitukset ja menetelmät perustuvat YK:n ilmastosopimuksen ja IPCC:n laatimiin raportointiohjeisiin. LULUCF-sektorilla laskennat noudattavat 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories -ohjeita (IPCC 2006). Skenaarioiden päästöt ja poistumat muodostuvat hiilivarastojen elävä biomassassa, kuollut puuainees, karie ja maaperä muutoksista (CO₂) sekä metaani- (CH₄) ja dityppioksidipäästöistä (N₂O). Skenaarioissa ei oleteta tai ole otettu huomioon ilmaston muutosta. Laskennoissa, joissa tarvitaan säädataa (kuten Yasso-mallinnuksessa), vuodesta 2017 vuoteen 2050 vuosittainen sää on vuosien 1980–2017 keskiarvo. Aineen, kuten biomassan, hiilisisältönä on käytetty 50 prosenttia. Hiili on muunnettu hiilidioksidiksi (CO₂) kertoimella (-44/12). Kaasut on yhteismitallistettu hiilidioksidiekvivalenteiksi KHK-inventaariossa käytetyillä IPCC:n neljännen maaraportin GWP (Global Warming Potential) -kertoimilla, jotka ovat CO₂:lle 1, CH₄:lle 25 ja N₂O:lle 298. Skenaarioissa käytetty maankäytön luokitus vastaa Suomen kasvihuonekaasuinventaarion luokitusta (Tilastokeskus 2019) ja on kuvattu raportissa Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050 (Aakkula et al. 2019).

LULUCF-sektori muodostuu kuudesta maankäyttöluokasta: metsämaa, viljelysmaa, ruohikkoalueet, kosteikot, rakennettu maa ja muu maa, sekä puutuotteista. Kukin maankäyttöluokka jakautui skenaariolaskennassa kahteen osaan siten, että tietyn vuoden päästöihin/poistumiin sisältyvät: 1) kyseisenä vuonna tapahtuvista maankäytön muutoksista aiheutuvat päästöt sekä tätä vuotta edeltävien 19 vuoden aikana tapahtuneiden muutosalueiden päästöt ja poistumat, 2) alueiden päästöt/poistumat, joilla ei ole tapahtunut maankäytön muutoksia tai muutoksesta on yli 20 vuotta.

Skenaarioissa maankäytön ja maankäytön muutosten pinta-alat jatkavat raportoitua aikasarjaa, joten kohdan (1) maankäytön muutosalueiden päästöihin ja poistumiin voi sisältyä vuonna 2017 tapahtuneilta muutosaloilta aiheutuvia päästöjä/poistumia vuoteen 2036 saakka. Tämä koskee etenkin WEM-skenaariota.

Metsämaan (ollut metsämaata yli 20 vuotta) puuston hiilivaraston muutokset laskettiin MELA-mallinnuksen tuottamien 10-vuotiskausittaisten puuston biomassavarastojen erotuksena. Elävästä ja luonnonpoistumapuustosta syntyvän karikkeen ja hakkuissa metsään jäävän karikkeen syötteet maaperälaskentaan ovat myös MELA-tuloksia (ks. Kuva 2). Metsitetyille alueille (ollut metsämaata korkeintaan 20 vuotta) puuston hiilivaraston muutos laskettiin kuten KHK-inventaariossa Valtakunnan metsien inventoinnin aineistoihin perustuvilla metsitysalueiden keskimääräisillä puuston kasvu- ja poistuma-arvioilla (Tilastokeskus 2019). Kivennäismaiden maaperän hiilivaraston muutokset estimoitiin Yasso07-maamallilla ja ojitettujen turvemaiden CO₂-, CH₄- ja N₂O-päästöt laskettiin kasvihuonekaasuinventaarion päästökertoimilla (Tilastokeskus 2019). Typpilannoituksen N₂O-päästöt ja kulotuksen CH₄-

ja N₂O-päästöt laskettiin vuosina 2012–2016 toteutuneiden päästöjen keskiarvona, kuten on raportoitu, ja metsitysalueille laskettiin myös typen mineralisaatiosta aiheutuva N₂O-päästö (Tilastokeskus 2019). Erialaisten metsäisten turvemaiden pinta-ala tiedot saatiin MELA-laskennan tuloksena.

Viljelysmaan kivennäismaiden hiilivaraston muutos estimoitiin Yasso07-maamallilla. Ruohikkoalueilla sen sijaan oletettiin, ettei kivennäismaan hiilivarastossa tapahtu muutosta. Sekä viljelysmaan että ruohikkoalueiden turvemaille käytettiin KHK-inventaarion päästökertoimia. Kasvien biomassat ja kasvilajikohtainen karikesyöte laskettiin KHK-inventaarion mukaisesti kuten myös biomassan ja kuolleiden puuaineksen hiilivarastojen muutokset sekä typen mineralisaatiosta ja typen huuhtoumasta aiheutuvat N₂O-päästöt (Tilastokeskus 2019).

Kosteikat jakautuvat toisistaan poikkeaviin alaluokkiin: turvetuotantoalueet, vähäpuustoiset metsämaasta taantuneet suot ja rakennetut sisävedet, joille päästöt laskettiin KHK-inventaarion menetelmillä ja kertoimilla (Tilastokeskus 2019b).

Rakennettujen alueiden tulokset sisältävät ainoastaan maankäytön muutosalueilta aiheutuvat päästöt ja poistumat. Kun muutoksesta on kulunut 20 vuotta, alue siirtyy rakennettuna maana vähintään 20 vuotta pysyneiden alueiden luokkaan, joilla KHK-inventaarion mukaisesti ei oletettu tapahtuvan hiilivarastojen muutoksia (Tilastokeskus 2019).

Puutuotteiden vaikutus laskettiin käyttäen tuotantoon perustuvaa lähestymistapaa ja menetelmä oli ensimmäisen asteen hajoamisfunktio käyttäen tuotteiden puoliintumisaikoja ja tuoteryhmäkohtaisia muuntokertoimia. Puutuotteiden pääryhmät ovat sahatavara, puulevyt, paperi ja kartonki. Sahatavaralle käytettiin 35 vuoden puoliintumisaikaa, puulevyille 25 vuoden ja paperille ja kartongille 2 vuoden. Lähtöoletukset liittyen metsäteollisuuden tuotannon kehitykseen kussakin skenaariossa harmonisoitiin eri mallilaskelmiin, ja puun kysyntä perustuu TIMES-VTT-mallinnuksen tuloksiin. Vähäpäästöskenaarioissa metsäteollisuuden jalostusasteen oletettiin kasvavan ja skenaarioihin oletettiin mukaan myös uusia tuotteita. Mekaanisen metsäteollisuuden osalta nämä uudet tuotteet käsiteltiin laskennassa pitkäikäisinä niin, että puolet tuotannosta laskettiin sahatavaran ja puolet puulevyjen puoliintumisaikoilla ja kertoimilla. Käytetty menetelmä perustuu IPCC 2006 -ohjeeseen ja on kuvattu Suomen inventaarioraportissa (IPCC 2006, Tilastokeskus 2019, Hamberg et al. 2016).

3.5 Kansantalouden tasapainomalli ja lähdeaineistot

Juha Honkatukia (Merit Economics)

Pitkän aikavälin energia- ja ilmastopoliittisten skenaarioita on arvioitu Suomen kansantaloutta kuvaavan laskennallisen mallin avulla. Kaikissa skenaarioissa talouden kuvaus perustuu arvioihin maailmanmarkkinoiden ja kotimaisen talouden keskeisten ajureiden kehityksestä.

Vaikutusten arvioinnin pohjana on käytetty dynaamista, yleisen tasapainon mallia FINAGE (ent. VATTAGE). Tällaista lähestymistapaa on käytetty jo pitkään kansantalouden pitkän aikavälin kehityksen arviointiin. Malli kuvaa talouden kehityksen taloudellisten toimijoiden päätöksistä seuraavina, taloudellisina toimina - kotitalouksien, yritysten ja julkisen sektorin päätöksistä käsin. FINAGE-mallin skenaariot ja niiden väliset kytkennät ulottuvat sekä vuosissa taaksepäin, että vuosissa eteenpäin. Historiaskenaarioissa käytetään kansantalouden toteutuneita tietoja tilastoista yms. talouden trendien tunnistamiseen ja laskentamallin kalibroimiseen historian kanssa konsistentiksi. Tulevien vuosien skenaarioiden pohjalla ovat osaltaan historialliset trendit – muun muassa tuottavuuskasvun tai maailmanmarkkinoiden muutosten reunaehto- ja kehityksen koskevat oletukset sekä tietyt, ennustettavat politiikkatoimet. Talousteoriat luovat sen kehikon, jolla historiaa mallissa tulkitaan, kun taas historiasta kumpuavat taloudelliset trendit ja muun muassa ennakoitu väestönkasvu luovat ne raamit, joissa taloudelliset toimijat tekevät päätöksiään. Yleensä tarkasteluun liittyy myös makrotalouden kehityssuunnuste, jolla kiinnitetään lähimmiksi vuosiksi huoltotaseen kehitysarvio esimerkiksi ministeriöiden politiikan suunnittelussa käyttämää vastaavaksi. Kotimaisen talouspolitiikan osalta skenaarioissa huomioidaan myös sellaiset toimet, joiden vaikutus ulottuu seuraaville vuosikymmenille. Näistä tärkeimpiä ovat eläkeuudistus, joka helpottaa muuten näköpiirissä olevaa työvoimapulaa etenkin 2020-luvulla. Lisäksi arvioissa on ennakoitu tekeillä olevan SOTE-uudistuksen vaikutuksia työvoiman tarpeeseen ja julkiseen talouteen.

FINAGE-mallilla tuotetuissa skenaarioissa talouden kehityksen taustatekijöiden oletetaan kehittyvän ”business-as-usual”, kun taas erilaisten talouspoliittisten tavoitteiden tai maailmantalouden tai teknologian reunaehto- ja muutosten vaikutusta arvioidaan vaihtoehtoisissa skenaarioissa. Tällä tavoin saadaan eristettyä tarkasteltavien ilmiöiden vaikutus talouskasvun taustatekijöistä. Tässä tutkimuksessa käytetyt skenaariot nojaavat monilta osin Honkatukian, Kohlin ja Lehtomaan (2018) tutkimukseen, jossa on kartoitettu Suomen kansantalouden pitkän aikavälin kasvun ajureita. Laskentamalleja on kuvattu useissa julkaisuissa (Honkatukia 2009, 2013) ja sen soveltamista täsmennetään luvussa 8, jossa on esitelty kansantalouden skenaarioita ja hiilineutraalisuustavoitteen vaikutuksia kansantalouteen.

3.6 Integroidut mallitarkastelut

Tiina Koljonen (VTT)

Tässä raportissa esitetyt laskennalliset analyysit ovat toteutettu integroidusti, eli laskelmissa on pyritty yhdenmukaistamaan lähtöoletuksia mahdollisuuksien mukaan ja lisäksi osaa yhden mallitarkasteluiden tuloksista on käytetty toisen mallitarkasteluiden lähtötietoina. Kyseessä on siten varsin raskas mallinnusjärjestelmä, jota on käytetty hiilineutraalisuuspolkujen laskennallisiin analyyseihin ja lisäksi lähestymistapa on iteratiivinen. Alla on pyritty kuvaamaan karkealla tasolla mallinnusjärjestelmä kokonaisuutena ja yksityiskohtaisemmat kuvaukset on esitetty luvuissa 5–8.

Maatalouden DREMFA-mallinnus tuottaa lähtötietoja sekä maatalouden KHK-päästölaskentaan että TIMES-VTT-mallinnukseen liittyen maatalouden tuotantomääriin (viljat, karjatalous, biokaasupotentiaali maatalouden sivuvirroista, tarvittava peltoala). TIMES-VTT mallinnus tuottaa puolestaan lähtötietoja teollisuus- ja energiapuun kysyntään liittyen, joita käytetään MELA-mallinnuksen lähtöaineistona arvioitaessa kotimaisten hakkuiden kehitystä. TIMES-VTT-malli tuottaa lähtöaineistoa myös FINAGE-kansantalouksmallinnukseen liittyen muun muassa energiahyödykkeiden kysyntään, hintaan ja energiajärjestelmään kohdistuvaan investointitarpeeseen. TIMES-VTT-mallin laskema KHK-päästövähennysten raja- eli marginaalikuluttannus on myös FINAGE-mallinnuksen yksi keskeinen lähtötieto. Sekä MELA- että TIMES-VTT-laskenta tuottavat lähtötietoja LULUCF-laskentaan. MELA tuottaa hakkuumäärät ja metsien kehitysarvion. TIMES-VTT-tuloksia hyödynnetään muun muassa arvioitaessa maankäytön kehitystä energiasektorin näkökulmasta (turpeen tuotanto, tuulivoima, jne.). LULUCF-laskennan tuloksena saatu maankäytön KHK-päästöjen ja -poistumien kehityksen nettotase toimii puolestaan TIMES-VTT-mallinnuksen lähtötietona, kun määritellään vuodelle 2035 asetettu KHK-päästötavoite ja kustannusoptimaalinen polku tähän päästötavoitteeseen pääsemiseksi.

Hankkeille asetetun aikataulun ja resurssien puitteissa ei ollut mahdollisuuksia syvälliseen iteratiiviseen tarkasteluun, jossa kaikki mallinnukset olisi toteutettu useaan kertaan. TIMES-VTT mallilaskenta toteutettiin kuitenkin kahteen kertaan, ja jälkimmäisellä laskentakierroksella pystyttiin vasta asettamaan KHK-päästötavoite siten, että Suomi saavuttaa hiilineutraalisuuden vuoteen 2035 mennessä. Lisäksi FINAGE-tulokset on esitetty siten, että kansantalouden laskelmien lähtötietoina on käytetty molempia TIMES-VTT-laskentatuloksia siten, että FINEAGE-tuloksien osalta toinen laskentatapa ei toteuttaisi hiilineutraalisuustavoitetta, mutta toinen toteuttaa (ns. nettonolla laskentatapaus). LULUCF-laskentaa ei sen sijaan päivitetty ns. lopullisilla TIMES-VTT-lähtötiedoilla ja -tuloksilla, mutta vaikutukset LULUCF-sektorin KHK-taseeseen ovat mitä todennäköisimmin vähäiset.

4. Vertailu- ja vähäpäästöskenaarioiden päivitettyt kuvaukset

Tässä luvussa on esitetty tiivistetysti WEM-, Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaarioiden lähtöoletukset painottuen erityisesti niihin lähtöoletuksiin, joihin on tehty muutoksia verrattuna aiempiin PITKO- ja MALULU-laskelmiin. Lisäksi joitain lähtötietoja, joita ei ole päivitetty, on esitetty yhteenvetomaisesti helpottamaan raportin luettavuutta.

4.1 Yhteenvedo skenaarioiden muodostuksen taustoista ja tärkeimmistä muutoksista

Tiina Koljonen (VTT)

Vertailu- eli WEM-skenaario on lähtökohtaisesti lähes sama, kuin mitä PITKO- ja MALULU-raporteissa on esitetty. Vuoteen 2030 asti WEM-skenaario noudattaa energia- ja ilmastostrategian ja KAISU:n selontekoraaportteissa (TEM 2017 & YM 2017) määriteltyjä lähtökohtia ja vuoden 2030–2050 kehitys on ekstrapoloitu, eli kehitys noudattaa samaa trendiä vuoteen 2050 asti. WEM-skenaarioiden peruslähtökohdaksi on, että Suomi saavuttaa vuodelle 2020 kansalliset energia- ja ilmastopoliittiset tavoitteet, jotka pysyvät muuttumattomina myös vuoden 2020 jälkeen. WEM-skenaariossa taakanjakosektorin päästöjä vähennetään siten 16 % vuoden 2005 päästöistä, mikä vastaa päästöissä 28,4 Mt CO₂-ekv. vuonna 2020. WEM-skenaariossa muu EU toteuttaa paitsi vuoden 2020 energia- ja ilmastotavoitteet myös vuodelle 2030 asetetun ilmastotavoitteen, jolloin EU-tason KHK-päästötavoite on -40 % vuoden 1990 päästöihin verrattuna.

Keskeinen WEM-skenaarioiden keskeinen lähtötieto on oletus päästöoikeuden hintakehityksestä vuoteen 2050, joka noudattaa komission ohjeistusta vertailuskenaarioiden lähtöoletuksista. Päästöoikeuden hinnaksi on oletettu 15 €/t CO₂ vuonna 2020 ja 30 €/t CO₂ vuonna 2030. Vuoden 2030 jälkeen päästöoikeuden hinta oletetaan nousevan jyrkemmin saavuttaen päästöoikeuden hintatasot 50 €/t CO₂ vuonna 2040 ja 90 €/t CO₂ vuonna 2050. Päästöoikeuden hintakehitys perustuu ns. PRIMES-referenssiskenaarioon vuodelta 2016 (EC 2016).

Vähäpäästöskenaarioiden osalta vuodelle 2050 asetetut KHK-päästövähennystavoitteet pidettiin edelleen samoina kuin aiemmissa PITKO-skenaarioissa, eli Jatkuva kasvu-skenaariossa KHK-päästötavoite vuoden 1990 päästöihin verrattuna on 87,5 % ja vastaavasti Säästö-skenaariossa 90 %. Molemmat vähäpäästöskenaariot lisäksi toteuttavat vuodelle 2035 asetetun hiilineutraalisuustavoitteen, mikä on linjassa uuden hallitusohjelman (VN 2019) kanssa. Vähäpäästöskenaarioiden on asetettu myös joukko energia- ja ilmastopoliittisia tavoitteita, jotka noudattavat energia- ja ilmastostrategian (TEM 2017) ja KAISU:n (YM 2017) linjauksia mukaan lukien hallituskauden 2015–2019 päätökset sekä nykyisen hallitusohjelman linjaukset soveltuvin osin. Vuodelle 2030 asetettuja tavoitteita ja toimia Suomelle tässä raportissa esitetyissä laskelmissa ovat mm.

- Taakanjakosektorin KHK-päästövähennystavoite 39 % vuoden 2005 päästötasoon verrattuna.
- Kivihiilen energiakäytöstä luopuminen viimeistään vuonna 2029.
- Turpeen käytön vähintään puolittaminen vuoteen 2030 mennessä.
- Biopolttoaineiden osuus tielikenteen energiankulutuksesta vuonna 2020 13,5 %:n energiasisältöosuudesta ja 30 % vuonna 2030 (kasvaa lineaarisesti). 10 %:n bionesteen sekoitusvelvoite rakennusten erillislämmityksessä käytettävälle kevyelle polttoöljylle ja työkoneiden dieselöljylle, joka kasvaa lineaarisesti vuosina 2020–2030.
- Sähkökäyttöisten autojen määrä on vähintään 250 000 (täyssähköautot, vetäytöt, ladattavat hybridit) ja vastaavasti kaasukäyttöisten autojen määrä on vähintään 50 000 vuonna 2030.
- 38 %:n uusiutuvan energian vähimmäisosuus energian loppukulutuksesta vuonna 2020 ja vastaavasti 50 %:n uusiutuvan energian vähimmäistavoite vuonna 2030.
- 55 %:n energian hankinnan omavaraisuustavoite vuonna 2030 ja tuontiöljyn energiankäytön puolittaminen.

Kahta alinta tavoitetta tarkastellaan TIMES-VTT-mallilaskelmien tulosten perusteella. Esimerkiksi investoinnit uusiutuvaan energiaan tapahtuvat laskelmissa kustannusjärjestyksessä lukuun ottamatta muita yllä esitettyjä linjauksia.

Vähäpäästöskenaarioissa päästöoikeudelle on asetettu sama hintaura koko EU-tasolla. Suomen hiilineutraalisuustavoite vuonna 2035 on tiukempi kuin EU:n ilmastotavoite. Tämän vuoksi KHK-päästöjen vähentämisen hintaohjauksen tulee olla merkittävämpää vähäpäästöskenaarioissa kuin WEM-skenaariossa, jolloin CO₂-hinta (l. päästöjen vähentämisen rajakustannus) on mallin laskema, eli endogeeninen (vrt. luku 7.1). KHK-päästöjen vähentämistä voidaan ohjata myös kansallisilla valmisteveroilla sekä investointi- tai muilla tuilla. WEM- ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa on oletettu nykyiset valmiste- ja muut verot sekä nykyinen tukipolitiikka liitetyen KHK-päästöjen vähentämiseen. Säästö-skenaariossa vero-ohjausta KHK-päästöjen vähentämiseksi on sen sijaan kasvatettu muuttamalla valmisteverojen tasoja, pois lukien liikenteen polttoaineet, ja luopumalla fossiilisten polttoaineiden tuista. Valmisteveroihin tehdyt muutokset perustuvat aiemman selvityksen (Koljonen et al. 2019b) vaikutusarvioihin ja johtopäätöksiin liittyen lämmityspolttoaineiden valmisteverojen kehittämiseen Suomessa.

4.2 Teollisuus

Antti Lehtilä (VTT)

4.2.1 Metsäteollisuus

Metsäteollisuuden tuotannon kehitysarviot pyrittiin muodostamaan siten, että ne toisaalta heijastavat viimeisimpiä kehitystrendejä, mutta myös edustavat kahta riittävän erilaista tulevaisuuskuva. Tuotannon kehitys määrittää suurelta osin kotimaisen puuston vuotuisen poistuman tasot ja sitä kautta nielujen kehityksen, joka voitiin skenaariotarkastelussa jo ennakoita arvioida hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamisen kannalta yhdeksi keskeisimmäksi yksittäiseksi tekijäksi. Tuontipuun osuus metsäteollisuuden ainespuun kokonaishankinnasta rajoitettiin kaikissa skenaarioissa korkeintaan 14,5 %:iin, joka vastaa suunnilleen vuosien 2000–2017 keskiarvoa.

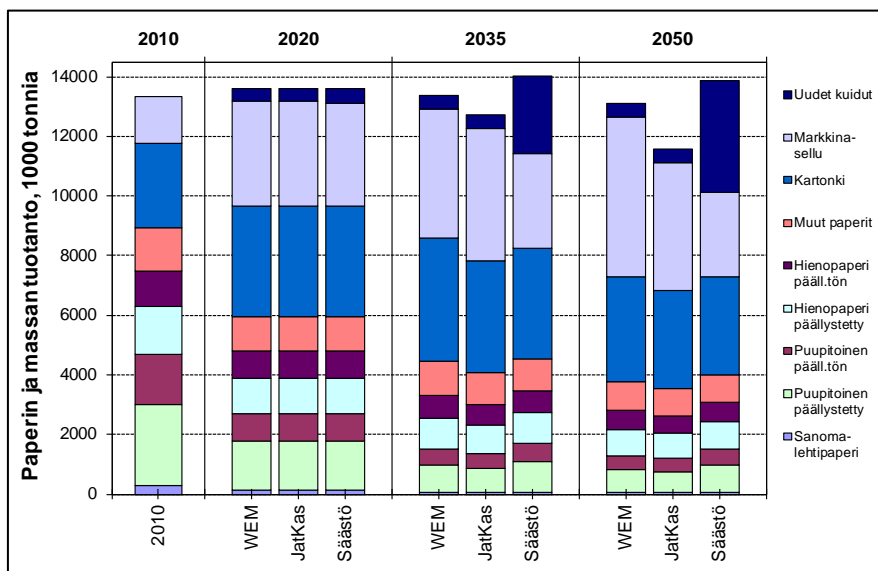
Metsäteollisuuden tuotannon kehitysarviot perustuvat vuoteen 2030 saakka suurelta osin Pöyryn vuonna 2016 tekemiin perusarvioihin (Pöyry 2016). Erityisesti WEM-skenaariot tuotanto-oletukset pohjautuvat massa- ja paperiteollisuudessa varsin suoraan niihin, viime vuosien toteutuneen kehityksen mukaisia tarkistuksia lukuun ottamatta. Vähäpäästöskenaarioista Säästö-skenaario puolestaan pohjautuu pitkälti VTT:n aiemmin laatimaan biotalousskenaarioon (VTT 2018), jonka mukaan tuotannossa siirrytään vähitellen uusien, korkeamman jalostusasteen tuotteisiin niin kemiallisen kuin mekaanisen metsäteollisuuden piirissä. Sellunvalmistuksessa tämä merkitsee siirtymää uusiin kuitutuotteisiin ja biokemian tuotteiden valmistamista muun muassa nykyisin valtaosin vain energiaksi hyödynnetyistä jäteliemien ligniini- ja hemiselluloosajakeista. Mekaanisen jalostuksen osalta se puolestaan tarkoittaa tavanomaista sahatavaraa huomattavasti pidemmälle jalostettujen puutuotteiden valmistusta (laminoitu viilupuu I. LVL, puukomposiitit, liimalamellit jne.), mikä näkyy sahatavaran tuotantovolyymien kääntymisenä vuoden 2030 jälkeen laskuun ja vastaavasti jalostetun sahatavaran volyymin kääntymisenä merkittävään nousuun. Paperituotteiden osalta oletetaan nykyisen laskevan trendin jatkuvan kaikissa kolmessa skenaariossa. Sen sijaan kartonkituotteiden osalta oletetaan, että globaali kysyntä ja siten myös kotimainen tuotanto kasvavat lähivuosikymmeninä, mutta vuodesta 2030 lähtien kasvutrendi hidastuu.

Uusista sellutehdashankkeista WEM- ja Jatkuva kasvu -skenaariot sisältävät Pöyryn (2016) kehitysarvion mukaisesti yhden suuren sellutehtaan suunnitellun investoinnin Itä-Suomeen. Säästö-skenaario sisältää näiden lisäksi yhden sellutehtaan laajennuksen Pohjois-Suomeen noin 800 kt:n vuotuista lisätuotantoa vastaavalla kapasiteetilla. Skenaarioiden väliseksi eroksi sellun kokonaistuotannossa tulee siten vuonna 2050 noin 2 miljoonaa tonnia. Kuvissa 4, 5 ja 6 on esitetty puumassan (kemiallinen sellu, puoliselä ja mekaaninen puumassa) tuotannon hahmotellut kehitysarviot WEM-, Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaariossa.

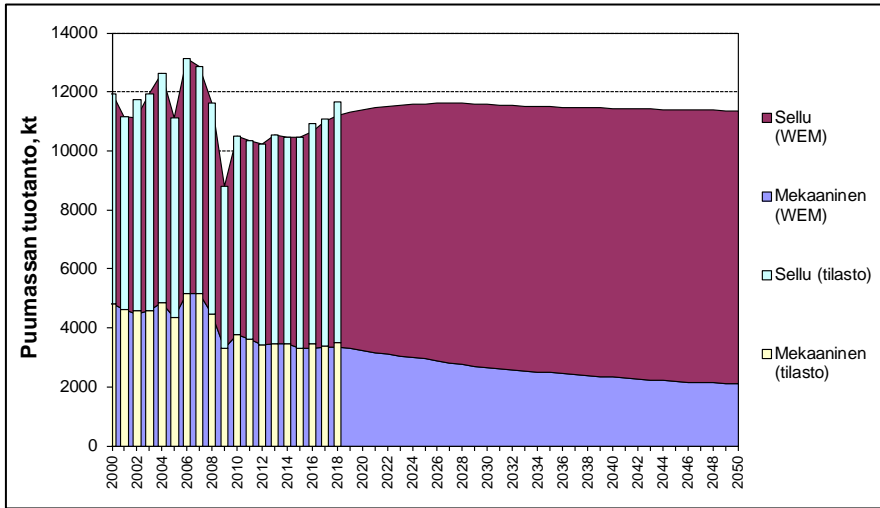
Skenaarioista Jatkuva kasvu -kehityspolussa metsäteollisuuden tuotannon volyymit kääntyvät selvimmin laskuun vuodesta 2030 lähtien. Lähtökohtaisesti on kui-

tenkin oletettu, että painottamalla korkeamman jalostusarvon tuotteisiin metsäteollisuuden tuotannon arvo pysyisi Jatkuva kasvu -skenaariossakin ainakin suunnitteen nykytasolla. Paitsi sellun osalta, metsäteollisuuden tuotannon volyymit ovat muutoinkin suurimmat Säästö-skenaariossa, jossa mm. oletetaan fossiilisten materiaalien merkittävää korvaamista biotuotteilla. Mallinnuksessa oletettiin puuta runsaasti kuluttavan liukosellun valmistusprosessin sopivan edustamaan uusien kuitutuotteiden raaka-ainepohjaa, ja sen tuotanto nousee siten Säästö-skenaariossa voimakkaasti, lähes neljään miljoonaan tonniin vuonna 2050. Näin ollen ainespuun käyttö massan tuotantoon kasvaa Säästö-skenaariossa itse asiassa selvästi voimakkaammin kuin pelkästään massamäärien kehityksestä voisi päätellä. Paperin, kartongin ja markkinasellun kokonaistuotannon kehitysarvioita on havainnollistettu kuvassa 3, ja koko metsäteollisuuden tuotannon skenaarioita vielä numeroina taulukossa 1.

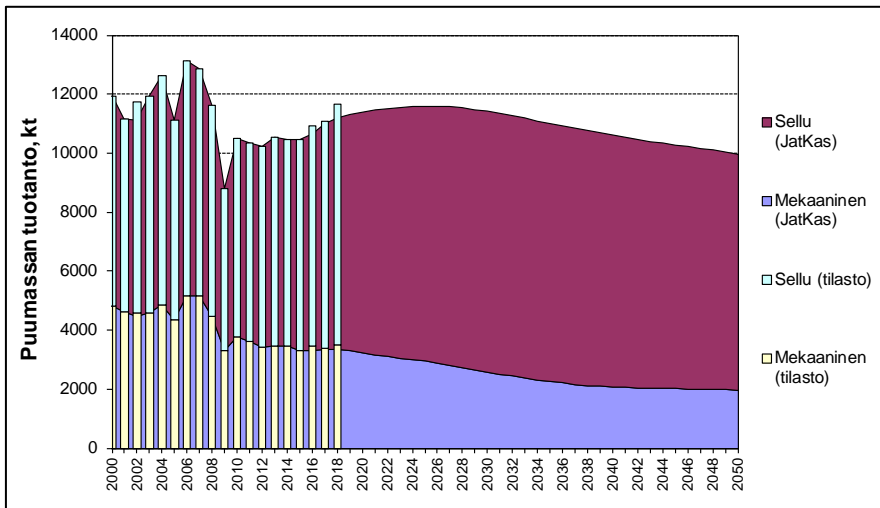
Säästö-skenaarion laajeneva ja tuotevalikoimaltaan monipuolistuva sellu- ja puutavaratuotanto merkitsee toisaalta myös kasvavaa metsäteollisuuden sivutuotteiden energiapotentiaalia, jota voidaan jalostaa edelleen tuotantoon integroiduissa biojalostamoissa. Jatkuvan kasvun skenaariossa sivutuotteiden merkitys bioenergiälähteenä jää selvästi pienemmäksi, mutta samalla pienempi kotimaisen ainespuun kokonaiskäyttö vaikuttaa vähentävästi puuston poistumaan ja sitä kautta kasvihuonekaasujen nettopäästöihin.



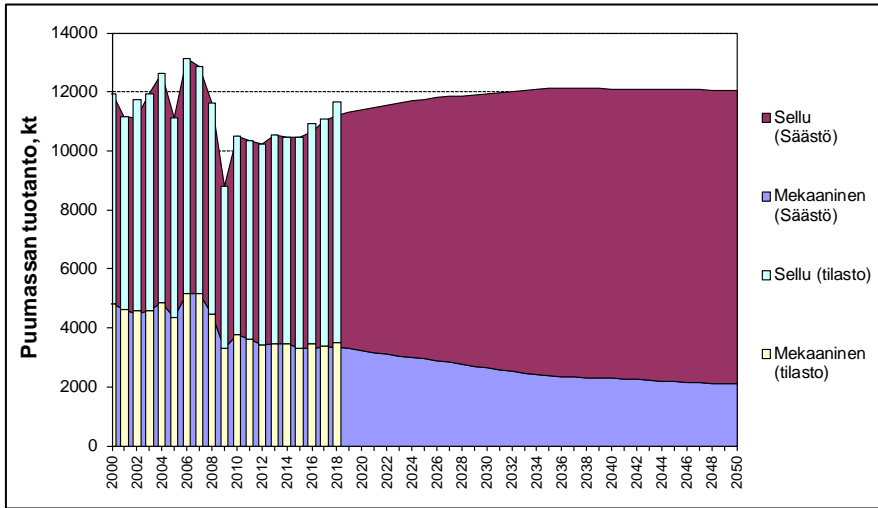
Kuva 3. Massa- ja paperiteollisuuden tuotannon kehitys skenaarioittain.



Kuva 4. Puumassan (kemiallinen sellu, puoliselku ja mekaaninen massa) tuotanto WEM-skenaariossa.



Kuva 5. Puumassan (kemiallinen sellu, puoliselku ja mekaaninen massa) tuotanto Jatkuva kasvu-skenaariossa.



Kuva 6. Puumassan (kemiallinen sellu, puolisellu ja mekaaninen massa) tuotanto Säästö-skenaariossa.

Taulukko 1. Metsäteollisuuden tuotannon keskeiset lähtöoletukset.

WEM	yks.	2010	2015	2020	2030	2040	2050
Paperi	1000 t	8928	7178	5964	4933	4195	3787
Kartonki	1000 t	2831	3105	3705	3997	3873	3497
Paperi + kartonki	1000 t	11759	10283	9669	8930	8068	7284
Markkinasellu, netto	1000 t	1909	2397	3511	4197	4737	5342
Uudet kuidut	1000 t	0	145	420	460	460	460
Sahatavara	1000 m ³	9400	10600	11900	12300	12700	13050
Vaneri	1000 m ³	980	1150	1215	1260	1285	1310
Levytuotteet	1000 m ³	342	200	145	140	140	140
LVL, komposiitit ym.	1000 m ³	90	110	210	300	400	500
Jatkuva kasvu	yks.	2010	2015	2020	2030	2040	2050
Paperi	1000 t	8928	7178	5964	4839	3735	3550
Kartonki	1000 t	2831	3105	3705	3921	3449	3278
Paperi + kartonki	1000 t	11759	10283	9669	8761	7183	6827
Markkinasellu, netto	1000 t	1909	2397	3511	4178	4589	4301
Uudet kuidut	1000 t	0	145	420	460	460	460
Sahatavara	1000 m ³	9400	10600	11900	12300	12700	13050
Vaneri	1000 m ³	980	1150	1215	1260	1285	1310
Levytuotteet	1000 m ³	342	200	145	140	140	140
LVL, komposiitit ym.	1000 m ³	90	110	210	900	1520	2200

Säästö	yks.	2010	2015	2020	2030	2040	2050
Paperi	1000 t	8928	7178	5964	5067	4370	4015
Kartonki	1000 t	2831	3105	3705	3863	3558	3269
Paperi + kartonki	1000 t	11759	10283	9669	8930	7929	7284
Markkinasellu, netto	1000 t	1909	2397	3431	3256	2636	2814
Uudet kuidut	1000 t	0	145	500	1800	3400	3750
Sahatavara	1000 m ³	9400	10600	11900	12000	10000	7750
Vaneri	1000 m ³	980	1150	1215	1250	1210	1210
Levytuotteet	1000 m ³	342	200	145	140	140	140
LVL, komposiitit ym.	1000 m ³	90	110	210	1450	4880	8000

4.2.2 Muu prosessiteollisuus

Perusmetallien tuotannon kehitysarvioiden osalta WEM-skenaario noudattaa vuoden 2017 energia- ja ilmastostrategian arvioita (TEM 2017). Tarkastelluissa vähäpäästöskenaarioissa alan tuotanto-oletuksia varioitiin jonkin verran skenaariotarioiden mukaisesti, mukailien VTT:n aiempien Low Carbon Finland platform-skenaarioiden oletuksia (Lehtilä et al. 2014). Tuotannon kokonaisvolyymien erot jäävät kuitenkin kohtuullisen pieniksi skenaarioiden välillä. Kummassakin vähäpäästöskenaariossa oletettiin masuuniteräksen valmistuksen täydellinen syrjäytyminen suorapelkistykseen perustuvalla teräksen valmistusprosessilla, joka tuo merkittävän lisän teollisuuden prosessipäästöjen kustannustehokkaaksi laskettavaan vähennyspotentiaaliin. Teräksen tuotannon osalta näköalat ovat tässä suhteessa jonkin verran muuttuneet verrattuna Low Carbon Finland -platform-skenaarioiden oletuksiin, joissa ainoastaan Muutos-skenaariossa oletettiin masuuniteräksen voivan korvautua Suomessa muilla prosesseilla.

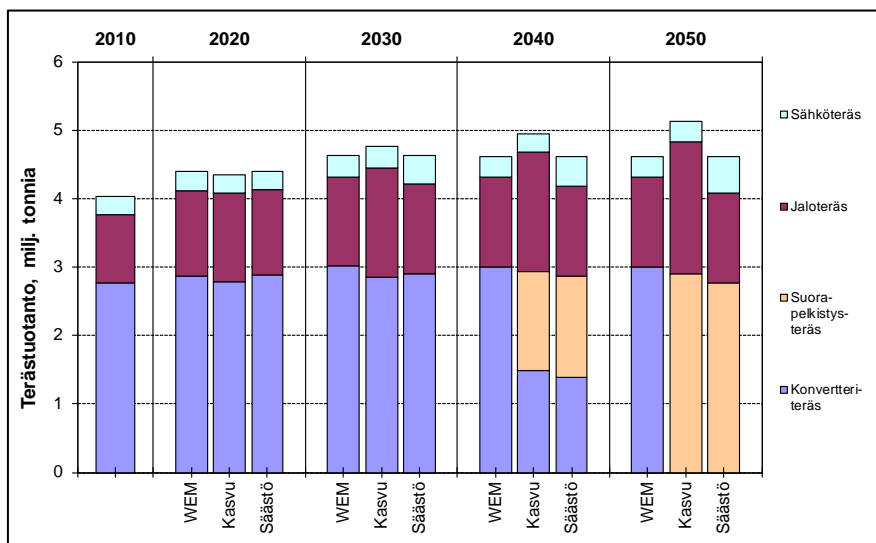
Teräksen tuotannon on oletettu kasvavan tuntuvammin ainoastaan Jatkuva kasvu -skenaariossa, jossa koko energijärjestelmän sähköistyminen ja siirtyminen globaalisti puhtaaseen energiaan luovat kasvavaa kysyntää erityisesti ruostumattoman teräksen tuotteille. Ferrokromin tuotannon on oletettu tällöin myös kasvavan nykyisestä. Masuuniteräksen ja sen korvaajaksi hahmotellun suorapelkistysteräksen tuotanto pysyy oletusten mukaan korkeintaan 3 milj. tonnissa. Uutta täysin romuteräksen perustuvan sähköteräksen tuotantoa ei oletettu syntyvän Suomeen merkittävässä määrin tulevina vuosikymmeninä.

Niin sanottujen värimetallien tuotannon ja jalostuksen on myös oletettu kasvavan vain hitaasti viime vuosien kehitystä mukailien. Energian kulutuksen kannalta merkittäviä ovat muun muassa kuparin, sinkin ja nikkelin jalostus. Värimetallien valmistuksen sähkön ja polttoaineiden kulutus on pysynyt vuosina 2010–2017 suunnilleen samalla tasolla, sähkön kulutus vajaassa 2 TWh:ssa.

Kiertotalouden hyödyntämisellä voi olla merkittävä rooli sekä teollisuusprosessien energiankulutuksen että niiden prosessipäästöjen vähentämisessä. Koska eri-

tyisesti Jatkuvan kasvun skenaarioissa CCS:n puuttuminen keinovalikoimasta vaikeuttaa päästötavoitteiden saavuttamista prosessiteollisuudessa, laskelmissa tehtiin oletus, jonka mukaan sementin valmistuksessa voidaan sen seosaineena yleisesti käytetyn masuunikuonan sijasta hyödyntää, toki rajoitetusti, kierrätysmateriaaleja sementin sidosaineiden valmistuksessa ja siten supistaa fossiilisen sementtiklinkkerin tuotannon lisäyaspainetta.

Kemianteollisuutta koskevat skenaario-oletukset olivat lähtökohtaisesti samat kuin PITKO-skenaarioissa ja ne on esitetty raportissa Koljonen et al. (2019).



Kuva 7. Terästeollisuuden tuotannon kehitysarviot skenaarioittain.

4.3 Energiantuotanto

Antti Lehtilä (VTT)

Energian tuotantoteknologioita koskevista oletuksista keskeisimpiin kuuluvat kivihii- len käyttöä koskevat oletukset. Vähähiiliskenaarioissa kivihii- len käyttöä yhdyskun- tien sähkön ja lämmön tuotantoon ei oletettu sallituksi vuoden 2025 jälkeen. Käy- tännössä kielto astuu voimaan vuonna 2029, mutta mallinnusteknisistä syistä (mal- lin laskentaperiodit) kielto asetettiin laskelmissa periodista 2030 lähtien.

Nykyisistä ydinvoimalaitoksista oletettiin kaikissa skenaarioissa Loviisan laitosten käyttöä pidentäminen 2040-luvun vaihteeseen ja Olkiluodon nykyisten laitosten käyttöä pidentäminen 2050-luvun vaihteeseen. Vuonna 2020 tuotantonsa aloitta- van Olkiluoto 3:n käyttöä oletettiin ulottuvan ainakin vuoteen 2070. Fennovoiman suunnitteleman Hanhikivi 1 -laitoksen oletettiin toteutuvan ja tulevan käyttöön noin

vuonna 2028. Näiden lisäksi uutta ydinvoimakapasiteettia oletettiin voitavan rakentaa ainoastaan Jatkuvan kasvun skenaariossa suurten kaupunkien modulaarisina ydin-CHP-laitoksina.

Pääkaupunkiseudun yhdyskuntien lämpöhuollon vähäpäästöisten vaihtoehtojen mallinnuksessa on lisäksi pyritty ottamaan tasapainoisesti huomioon lämpöpumput, bioenergia ja hukkalämpöjen hyödyntäminen sekä Jatkuvan kasvun skenaariossa myös edellä mainittu modulaarinen ydinenergiatekniikka.

Tuulivoiman potentiaalit on arvioitu laskentamallissa sijoituspaikan perusteella onshore / tunturit / nearshore / offshore -jaottelun mukaisesti, sekä lisäksi tuulisuusluokittain. Potentiaalit on arvioitu realistisina toteutettavissa olevina potentiaaleina, jotka ovat teoreettisia potentiaaleja paljon pienempiä. Onshore-tuulivoiman potentiaaliksi on arvioitu vuonna 2050 noin 16 TWh, tuntureille noin 5 TWh, nearshore-potentiaaliksi 12 TWh ja offshore-potentiaaliksi noin 40 TWh, eli yhteensä runsaat 70 TWh. VTT:n tuulivoima-asiantuntijoiden perusarvio teknis-taloudellisesta potentiaalista vuodelle 2050 on selvästi pienempi, yhteensä noin 28 TWh. Onshore-tuulivoiman investointikustannusten on oletettu alenevan vuoteen 2050 mennessä 850 €/kW:n tasolle ja offshore-merituulivoiman 1600 €/kW:n tasolle. Kustannusten kehitysarviot perustuvat Tanskan energiaviranomaisen teknologiatietokantaan (DEA 2018) ja VTT:n tuulivoima-asiantuntijoiden arvioihin.

Aurinkovoiman potentiaalia rajoittavat kiinteistösovelluksissa kattopinta-alat. Kattoille asennettavan tuotannon potentiaali oli arvioitu vuonna 2050 noin 12 GW:ksi, joka on lähellä Pöyryn esittämää laskennallista potentiaaliarviota (Pöyry 2017). Näiden lisäksi on ison laitoskokuolon potentiaali, joka voidaan arvioida hyvin suureksi. Aurinkovoiman investointikustannusten on oletettu alenevan nopean teknisen kehityksen jatkuessa pienissä kiinteistösovelluksissa noin 600 €/kW:n tasolle ja isommissa laitoksissa 400 €/kW:n tasolle, samalla kun laitosten tekninen käyttöikä pitenee 40 vuoteen ja käyttökustannukset putoavat. WEM-skenaarioissa kustannuskehitys oletettiin hieman hitaammaksi (700 / 500 €/kW). Kehitysarviot ovat lähellä DEA:n teknologiatietokannan arvioita, siten että nopean kehityksen arviot ovat niitä hieman alempia ja hitaan kehityksen arviot hieman korkeampia.

4.4 Liikenne

Antti Lehtilä (VTT)

Mallinnuksessa henkilö- ja tavaraliikenteen pitkän aikavälin kehitysarvioita koskevat oletukset voidaan jakaa seuraaviin osa-alueisiin:

- yleiset henkilöiden ja tavaroiden liikkumistarvetta koskevat oletukset (henkilökilometrien ja tavaratonnikilometrien kysyntä)
- liikkumismuotojen markkinaosuuksien kehitystä koskevat oletukset (henkilö- ja tavaraliikenteen jakaantuminen liikennemuodoittain)
- liikkumismuotojen suoritetehokkuutta koskevat oletukset (henkilö- ja tonnikilometrit liikennevälineiden kilometriä kohti)

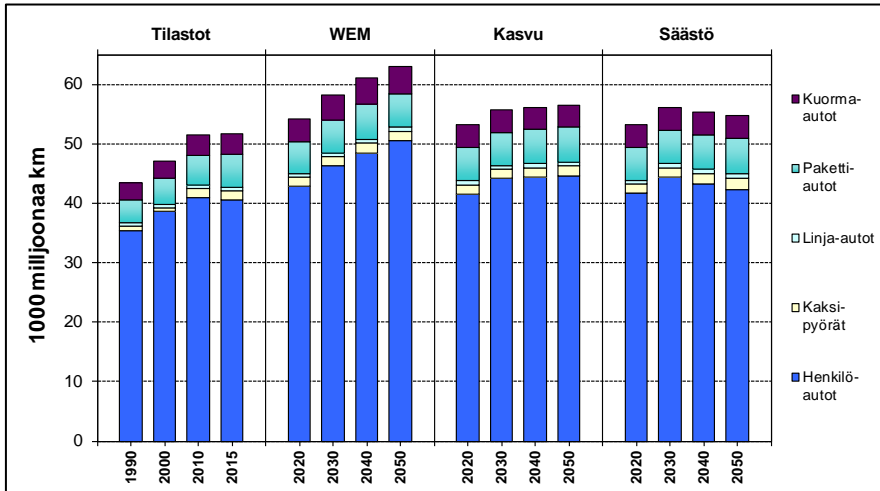
- eri tekniikoiden markkinaosuuksia koskevat oletukset kussakin liikkumis-
muodossa
- liikennevälineiden energiatehokkuutta ja kustannuksia koskevat oletukset.

Mallitarkastelussa eri liikennevälineiden energiatehokkuuden ja kustannusten kehitysarvioita ei juurikaan varioitu skenaarioiden välillä, ja lähtöoletukset perustuvat teknologian kehitystä arvioiviin julkaisuihin.¹ Muissa oletuksissa sen sijaan skenaarioiden välille pyrittiin saamaan selviä eroja skenaariotarinoiden mukaan, ja siinä käytettiin hyväksi liikenne- ja viestintäministeriön ilmastopolitiikan työryhmän (ILMO) skenaarioita siten, että BIO-polku edustaa suunnilleen Säästö-skenaariota, ja TEKNO-polku suunnilleen Jatkuvan kasvun skenaariota (Särkijärvi et al. 2018). Jatkuva kasvu -skenaarioiden lähtökohtana on siten liikenteen nopea sähköistyminen ja Säästö-skenaarioiden lähtökohtana painottuminen uusiutuviin polttoaineisiin.

Taulukko 2. Henkilöautokannan kehitys eri skenaarioissa. Sähköautot sisältävät täyssähköautot ja ladattavat hybridit, joiden yhteenlaskettu lukumäärä vuonna 2019 oli noin 27 000 (Traficom 2020). Kaasuautot sisältävät kaasuautot ja bensiini/kaasuautot, joiden yhteenlaskettu lukumäärä vuonna 2019 oli yli 9000 (Traficom 2020).

Henkilöautot tuhatta	2017	WEM	Jatkuva kasvu 2030	Säästö	WEM	Jatkuva kasvu 2050	Säästö
Bensiini	1917	1499	1295	1435	655	61	557
Täysetanoli	4	3	3	3	1	1	1
Diesel	732	1267	704	1000	1287	156	1057
Kaasu	3	20	138	94	42	162	148
Sähkö	7	151	730	342	1045	2444	794
Vety	0	0	20	25	141	241	418
Yhteensä	2663	2940	2889	2899	3170	3065	2976

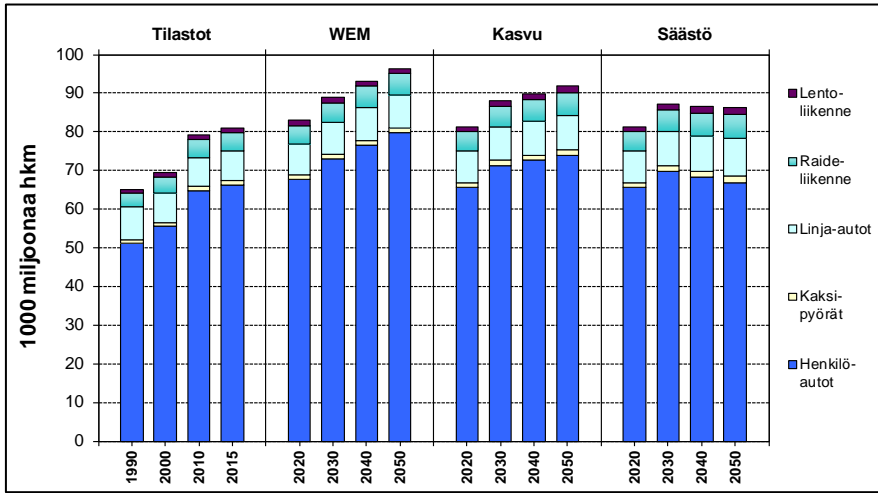
¹ Teknologia-arvioissa hyödynnetty monia eri julkaisuja, esim. *Low-carbon cars in Europe: A socio-economic assessment*. European Climate Foundation, Cambridge Econometrics, 2018.



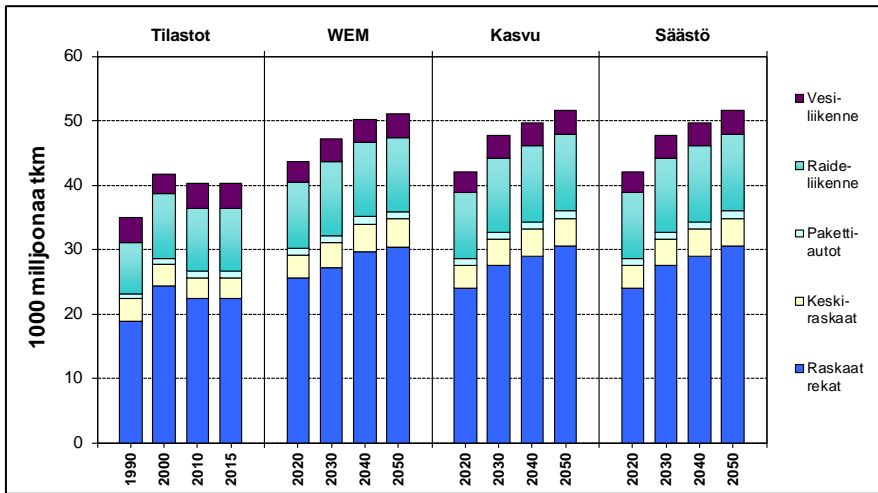
Kuva 8. Tieliikenteen ajoneuvosuoritteiden kehitys eri skenaarioissa.

Tieliikenteen ajoneuvosuoritteita koskevat oletukset perustuvat WEM-skenaarion osalta VTT:n Lipasto-laskentajärjestelmän ennusteeseen. Jatkuvan kasvun skenaariossa oletettiin henkilöautosuoritteiden kasvun jäävän vuoden 2017 energia- ja ilmastostrategian WAM-skenaarioiden tavoin hieman WEM-skenaariota pienemmäksi siten, että vuonna 2050 suoritteet ovat noin 12 % WEM-skenaariota pienemmät. Suorite on tällöin vuonna 2050 vain noin 10 % vuoden 2015 määrää suurempi. Säästö-skenaariossa oletettiin jonkin verran lisäsiirtymää kevyeen ja julkiseen liikenteeseen, jolloin vastaava kasvu jää 4,3 %:iin. Tavaraliikenteen osalta erot skenaarioiden välillä jäävät pieniksi, eli kaikki skenaariot ovat lähellä Lipasto-järjestelmän ennustetta. Säästö-skenaariossa teollisuuden kuljetusten on arvioitu nousevan metsäteollisuuden laajemman tuotannon vuoksi hieman suuremmiksi, mutta sitä kompensoi kuljetusten suorittehokkuuden paraneminen. Ajoneuvosuoritteiden oletettua kehitystä on havainnollistettu kuvassa 8 ja liikennesuoritteiden kehitystä kuvissa 9 ja 10.

Eri ajoneuvotekniikoiden markkinaosuuksien kehitystä koskevat oletukset asetettiin WEM-skenaariossa vuoden 2017 energia- ja ilmastostrategian vastaavien oletusten mukaan ja vähähiiliskenaariossa edellä kuvatun mukaisesti liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän (ILMO) tavoitepolkujen hahmottelemia muutoksia muokaten (Särkijärvi et al. 2018).



Kuva 9. Henkilöliikenteen volyymin kehitys eri skenaarioissa (henkilökilometrit).



Kuva 10. Tavaraliikenteen volyymin kehitys eri skenaarioissa (tonnikilometrit).

4.5 Rakennukset

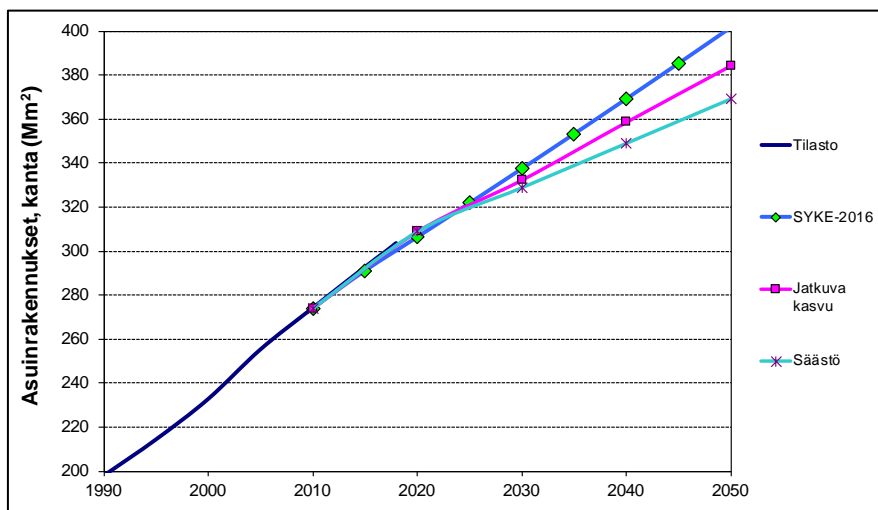
Antti Lehtilä (VTT)

Rakennuskannan energiankulutuksen arvioimisen pohjana on skenaario, joka perustuu virallisiin tilastoihin ja Suomen ympäristökeskuksen julkaisemaan rakennusten energiankulutuksen perusskenaarioon (Mattinen et al. 2016). Muuntelemalla

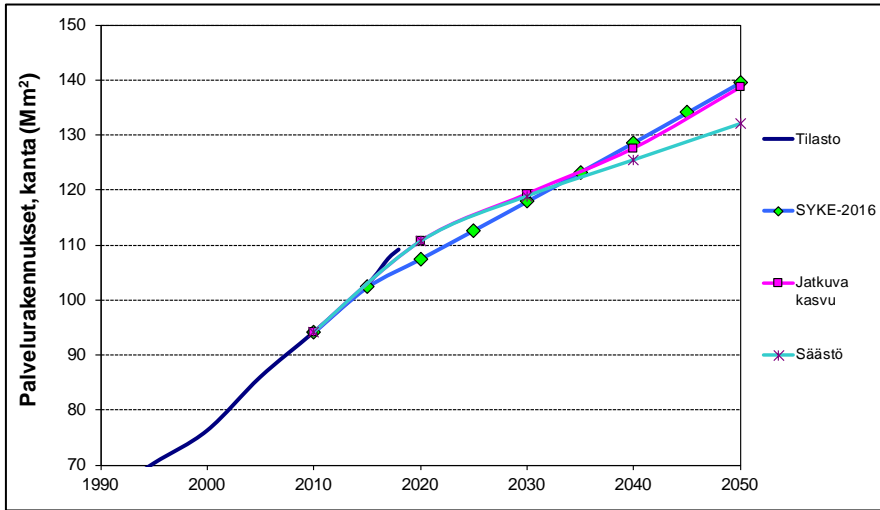
tätä perusuraa PITKO-hankkeessa laadittiin neljä erilaista skenaariopolkua rakennuskannalle (Koljonen et al. 2019). Ennakoidut uudisrakentamisen määrät ja vanhojen rakennusten korjaukset ja poistuma vaihtelevat laskelmissa sekä rakennustyypeittäin että ajanjaksoittain. Rakennusskenaarioiden laskennassa on käytetty apuna VTT:llä kehitettyä REMA-laskentamallia (Tuominen et al. 2014), joka on kuvattu luvussa 3.2.

Kuva 4 esittää asuinrakennuskannan kehityksen kussakin skenaariossa. Jatkuva kasvu -skenaariossa kaupungistuminen voimistuu, mikä vaikuttaa asumistiiveyttä kasvattaen perusuraan verrattuna. Skenaario kuitenkin olettaa, että hakeutuminen kaupunkiin tapahtuu merkittävässä määrin pientaloalueille, joten tiivistyminen ei ole kovin voimakasta. Säästö-skenaariossa kaupungistuminen hidastuu, mutta vaikka asuminen on hajaantuneempaa, ihmiset ovat valmiita tinkimään asuinlii- öistä verrattuna perusuraan. Säästö-skenaariossa kaupungistumisen ja tiiviimmän asumisen voidaan ajatella yleistyvän taloudellisen pakon vuoksi. Esimerkiksi paris- kuntien on oletettu muuttavan keskimäärin aiemmin yhteiseen asuntoon ja nuorten elävän pidempään vanhempiensa kodissa.

Kuva 12 esittää palvelurakennuskannan kehityksen eri skenaarioissa. Palvelurakennukset sisältävät Tilastokeskuksen termejä käyttäen liikerakennukset, toimistorakennukset, liikenteen rakennukset, hoitoalan rakennukset, kokoontumisrakennukset ja opetusrakennukset. Jatkuva kasvu -skenaariossa edetään WEM-perus- uran kaltaisesti, niin että ajavana voimana palvelurakennusten määrän kasvulle ovat mm. palveluvaltaistuminen ja elintason kasvu. Säästö-skenaariossa tilankäy- tön tehostumista on jonkin verran lähinnä kunnianhimoisempien tilatehokkuus- ja ympäristötavoitteiden vuoksi.



Kuva 11. Asuinrakennuskannan volyymin kehitys (pientalot, rivi- ja kerrostalot) skenaarioittain. WEM-skenaario perustuu Syke:n (Miettinen et al. 2016) arvioon rakennusten energiankulutuksen perusskenaariosta.



Kuva 12. Palvelurakennuskannan volyymin kehitys skenaarioittain. WEM-skenaario perustuu Syke:n (Miettinen et al. 2016) arvioon rakennusten energiankulutuksen perusskenaariosta.

Rakennuskannan muutosten lisäksi skenaarioissa on oletettu muutoksia rakentamistapaan ja sen vaikutuksiin rakennusten energiankulutukseen. Taulukko 3 esittää uusien rakennusten keskimääräisen lämpöenergiankulutuksen eri skenaarioissa Suomessa pois lukien metropolialueen, jossa on oletettu hieman tätä taulukkoa alemmat kulutukset (noin 5 %) ilmastollisista syistä. Perusurassa ajatellaan rakentamistavan säilyvän 2020 vuoden tasolla eikä uusia toimenpiteitä oteta käyttöön. Jatkuva kasvu -skenaariossa oletetaan säädosohjauksen ja teollisuuden tekemän kehitystoiminnan vievän kulutusta tulevaisuudessa alaspäin. Säästö-skenaariossa oletetaan energiankäytön tehostamistavoitteiden olevan tätä vielä kunnianhimoisempia.

Vanhan rakennuskannan energiankulutus muuttuu myös ajan oloon poistuman ja korjausten kautta. Tässä vanhalla rakennuskannalla tarkoitetaan vuonna 2010 olemassa olleita rakennuksia. Taulukot 4 ja 5 näyttävät skenaariokohtaisesti ennakoitua muutokset eri rakennustyyppien keskimääräisessä energiankulutuksessa. Perusurassa poistuma ja korjaukset noudattelevat nykyistä pitkän aikavälin trendiä. Jatkuvassa kasvussa on oletettu korjausrakentamisen lisääntyvän nykyisestäään, mutta poistuman pysyvän ennallaan. Myös Säästö-skenaariossa on ajateltu energiakorjaamisen yleistyvän ja samalla vanhojen rakennusten käyttöiän kasvun vähentävän kannan poistumaa.

Ominaiskulutusten pienenemisen myötä voidaan arvioida asumisen ja palveluiden energian loppukulutuksen pienenevän vähäpäästöskenaarioissa jopa yli 30 % vuoden 2010 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Rakennusten lämmityksessä jäljellä olevat öljylämmitysjärjestelmät voidaan korvata vuoden 2030 jälkeen lämpöpum-

puilla, sähkölämmityksellä ja biopolttoaineilla, joiden keskinäisen markkinaosuuk-
sien kehityksen laskentamalli tuottaa. Biopolttonesteillä on ainakin siirtymäkaudella
2030–2050 tuloksissa näkyvä merkitys, sillä hyvälaatuista bioöljyä voidaan sekoit-
taa lämmitysöljyyn ja siten käyttää etenkin olemassa olevissa lämpökattiloissa
mutta mahdollisesti myös uusissa. Energiatehokkuuden paranemisen myötä joiden-
kin uusiutuvaan energiaan perustuvien lämmitysjärjestelmien kilpailukyvyyn voidaan
kuitenkin arvioida heikkenevän erityisesti uudisrakennuksissa, ainakin suoraan säh-
kölämmitykseen ja ilmalämpöpumppeihin verrattuna. Tämä johtuu järjestelmien kor-
keista kiinteistä kustannuksista, ja koskee muun muassa kiinteiden puupolttoainei-
den kattiloita ja aurinkolämmitystä.

Taulukko 3. Uusien rakennusten keskimääräinen lämpöenergiankulutus (kWh/m²/a) sisältäen rakennusten lämmityksen ja lämpimän käyttöveden eri ske-
naarioissa.

	2010	2020	2030	2050
Pientalot				
Baseline	118	96	96	96
Jatkuva kasvu	118	84	66	47
Säästö	118	81	62	42
Kerros- ja rivitalot				
Baseline	82	80	80	80
Jatkuva kasvu	82	66	57	47
Säästö	82	64	53	42
Liike- ja palvelurakennukset				
Baseline	66	57	57	57
Jatkuva kasvu	66	57	52	47
Säästö	66	53	46	39

Taulukko 4. Vanhan rakennuskannan lämpöenergiankulutus (kWh/m²/a) sisältäen rakennusten lämmityksen ja lämpimän käyttöveden Suomessa pois lukien metro-
polialueen.

	2010	2020	2030	2050
Pientalot				
Baseline	204	194	184	167
Jatkuva kasvu / Muutos	204	194	158	120
Säästö	204	194	171	143
Kerros- ja rivitalot				
Baseline	171	164	158	145
Jatkuva kasvu / Muutos	171	164	127	107
Säästö	171	164	142	126
Liike- ja palvelurakennukset				
Baseline	163	155	146	127
Jatkuva kasvu / Muutos	163	155	125	100
Säästö	163	155	136	114

Taulukko 5. Vanhan rakennuskannan lämpöenergiankulutus (kWh/m²/a) sisältäen rakennusten lämmityksen ja lämpimän käyttöveden metropolialueella.

	2010	2020	2030	2050
Pientalot				
Baseline	186	176	162	152
Jatkuva kasvu / Muutos	186	176	142	114
Säästö	186	176	154	136
Kerros- ja rivitalot				
Baseline	148	144	152	142
Jatkuva kasvu / Muutos	148	144	122	105
Säästö	148	144	137	124
Liike- ja palvelurakennukset				
Baseline	163	159	142	125
Jatkuva kasvu / Muutos	163	159	122	98
Säästö	163	159	132	111

4.6 Maatalous

Heikki Lehtonen (Luke)

4.6.1 WEM-skenaario maatalouden osalta

Väestökehityksen vuoteen 2050 on oletettu noudattavan Tilastokeskuksen vuoden 2015 ennustetta, jonka mukaan väkiluku on noin 5,8 miljoonaa vuonna 2030 ja 5,9 miljoonaa vuonna 2050 (Tilastokeskus 2015). Tämä tarkoittaa sitä, että kaikkien elintarvikkeiden kotimainen kysyntä kasvaa noin 5 % vuoteen 2030 mennessä, kun elintarvikkeiden kulutuksen henkilöä kohden oletetaan WEM-skenaariossa pysyvän vuoden 2018 tasolla ajanjaksolla 2019–2050. Poikkeuksena on siipikarjanlihan kulutus, 2000-luvulla voimakkaana jatkuneen kasvun oletetaan pysähtyvän 140 milj. kg tasolle vuodesta 2020 alkaen (vuonna 2018 kulutus oli 135 milj. kg). Vuonna 2018 siipikarjanlihan kotimainen tuotanto oli likimain samansuuruinen kuin kulutus.

Energian hinnat noudattavat IEA World Energy Outlook 2019 -julkaisun hintoja eri energiatuotteille, joista Suomen maatalouden kannalta tärkeimpiä ovat polttoaineet ja sähkö (IEA 2019). Ennustettu energian hintojen nopea nousu 2020-luvulla nostaa etenkin polttoainekustannuksia (23 % v. 2018–2028) ja vähäisemmässä määrin lannoitteiden hintoja (13 % v. 2018–2028).

Maataloustuotteiden tuotehintojen maailmanmarkkinoilla ja Euroopassa on oletettu kehittyvän kuten arvioidaan julkaisussa OECD-FAO Agricultural Outlook 2019–2028, jossa oletetaan mm. IEA (2019) mukaiset energian hinnat. Tuotehintojen on WEM-skenaariossa oletettu pysyvän entisellään 2028 jälkeen. Maataloustuotteiden reaali hinnat eli tuotehintakehitys panoshintoihin nähden pysyy likimain ennallaan etenkin kasvituotteissa. Pientä reaali hintojen nousua tapahtuu eräissä maitotalous-

tuotteissa kuten maitojauheissa ja juustoissa, mutta kokonaisuutena maitosektorilakin on hyvin maltillinen hintakehitys. Taustalla OECD-FAO (2019) hintaennusteissa vuoteen 2028 on oletuksia ja globaalitason mallinnustuloksia siitä, että maailman elintarviketalous pystyy edelleen vastaamaan ruuan kysynnän kasvuun eri tavoin 2020-luvulla.

Maatalouspolitiikka on oletettu WEM-skenaariossa samanlaiseksi kuin 2014–2020 kauden maatalouspolitiikka. Mahdollisia EU-tukien vähenemisiä ei ole huomioitu 2020 jälkeen. Pinta-alalle maksettavien tukien pienellä vähenemisellä olisi hyvin vähäinen vaikutus maatalouden tuotantomääriin.

Tuottavuus kasvaa maataloudessa edelleen, etenkin lypsykarjataloudessa, jossa toteutuu laajamittainen siirtyminen yhden lypsyrobotin yksiköistä kahden tai useamman robotin yksiköihin 2020–2030-luvuilla. Tämä muutos on jo käynnissä ja lisää työn käytön tehokkuutta tuotannossa (Lehtonen et al. 2017). Myös muussa kotieläintaloudessa tuottavuuden kasvu jatkuu lähinnä työn tuottavuuden osalta, mutta vähemmän kasvintuotannossa, jossa satotasojen oletetaan säilyvän ennallaan. Lannoitteiden kallistuminen useilla prosenteilla 2020-luvulla alkupuoliskolla alentaa tosin satotasoa 1–3 % eri kasveilla.

4.6.2 Jatkuva kasvu -skenaario maatalouden osalta

Jatkuva kasvu -skenaarion oletuksia maataloudelle määriteltiin jo aiemmassa Suomen kokonaispäästökehitystä käsittelevässä raportissa alkuvuodesta 2019 (Koljonen et al. 2019a; s. 29). Näitä yleisluontoisia oletuksia tarkennetaan seuraavassa.

Sidosryhmille järjestettyjen PITKO-työpajojen tulosten mukaisesti Koljonen et al. 2019a päätyivät seuraavanlaiseen yleisluontoiseen määrittelyyn Suomen maa- ja metsätaloudesta Jatkuva kasvu-skenaariossa: ”Tuotannon tehostuminen digitalisaation, rakennemuutoksen ja teknologian intensiivisen hyödyntämisen kautta. Maataloustuotteiden erikoistuminen, pidemmällä aikavälillä synteettinen ruuantuotanto. Vahva T&K&I -panostus ja julkisen sektorin ohjaus. Tukia tarvitaan 2030–40, mutta 2050 järjestelmä toimii jo markkinaehtoisesti.”

Toisaalta todetaan, että ympäristötietoisuus on vahvaa tässä skenaariossa, mikä voi tarkoittaa mm. kotieläintuotteiden osuuden selvää laskua ruokavalioiden ja korvautumisella kasvisperäisillä ja synteettisillä tuotteilla. Maatalouden toimenpiteistä todetaan erikseen seuraavaa (Koljonen et al. 2019a, s. 29): ”Biokaasun tuotanto ja käyttö ylös tukijärjestelmän ja teknologian avulla. Lannasta energiaa, teollisuuden biomassoista maanparannusaineita. Karjankasvatuksen päästöt alas tutkimuksen ja neuvonnan myötä. Kuluttajien ruokailutottumusten hintaohjaus. Täsmäviljely: tuottavuus kasvaa lannoituksen kokonaismäärää kasvattamatta.”

Mitä tämä voisi tarkoittaa maatalouden kehitykselle Suomessa, osana Euroopan ja maailmanlaajuisia ruoka- ja maataloustuotteiden markkinoita?

Tuottavuuden kasvu lannoitusta lisäämättä voisi tarkoittaa satotason pientä nousua lannoitusta lisäämättä. Tämä on jossain määrin mahdollista, koska typen ja pieneltä osin myös fosforin ravinnetaset ovat keskimäärin selvästi positiiviset, ts. ravinteita korjataan sadon mukana hehtaaria kohden vähemmän kuin kasveja lannoit-

tetaan (Turtola et al. 2017). Täsmäviljelyllä ja etenkin uusilla pitenevän kasvukauden aiempaa paremmin hyödyntävillä kasvilajikkeilla lannoiteravinteiden hyödyntämistä voidaan kuitenkin vähitellen parantaa, ainakin vähän tai jopa merkittävästi. Tämän perusteella oletetaan, että satotasot nousevat +10 % asteittain 2021–2045 ilman typpilannoituksen lisäämistä.

Maataloustuotteiden ja erityisesti kotieläintuotteiden kysyntä kasvaa globaalisti, eniten suuressa osassa kehittyviä talouksia Jatkuva kasvu -skenaariossa. Vahva kysyntä nostaa maataloustuotteiden hintoja Jatkuva kasvu -skenaariossa suhteessa WEM-skenaarioon seuraavasti: kasvituotteet (viljat, öljykasvit, valkuaiskasvit) +15 %, liha (nauta, sika, siipikarja) +8 %, maitotuotteet (kautta linjan) +4 % vuodesta 2020 vuoteen 2045. Hintamuutokset oletetaan toteutuvaksi jo vuoteen 2045, jotta DREMFA-sektorimallin tulokset vastaisivat tasapainotilaa 2050.

Ruokavaliot muuttuvat Jatkuva kasvu-skenaariossa siten, että kotieläintuotteiden osuus vähenee ja kasvituotteiden kasvaa. Voidaan olettaa, että tämä kehitys alkaa Jatkuva kasvu-skenaariossa jo 2020-luvulla ja kiihtyy 2030- ja 2040-luvuilla. Lihan ja maitotuotteiden kysyntä vähenee noin 50 % vuoteen 2050 mennessä ja vastaavasti kasvituotteiden kulutus kasvaa (Taulukko 6), samoin kalan. Taulukon 6 kulutusmuutoksista toteutuu puolet vuoteen 2035 mennessä. Esimerkiksi maito- ja lihatuotteiden kulutus vähenee 25 % Jatkuva kasvu-skenaariossa ja 15 % Säästö-skenaariossa vuosina 2021–2035.

Taulukko 6. Eri maataloustuotteiden kulutuksen asteittainen muutos aikavälillä 2021-2045 vuodesta 2018 Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaarioissa.

Tuote	Jatkuva kasvu	Säästö
Maitotuotteet (kaikki)	-50 %	-30 %
Naudanliha	-50 %	-30 %
Sianliha	-50 %	-30 %
Siipikarjanliha	-50 %	-30 %
Muu liha (lammas, poro, riista)	0 %	0 %
Kananmunat	0 %	0 %
Vehnä	10 %	5 %
Ruis	100 %	70 %
Ohra	30 %	20 %
Kaura (sis. kaurajuomiin kuluva kauran)	317 %	200 %
Palkokasvit (herne ym., myös jalosteina)	800 %	500 %
Kala (ei mukana maatalouteen liittyvissä laskelmissa)	75 %	50 %

Tuotantojärjestelmän korostunut globaalin tason markkinaehtoisuus Jatkuva kasvu-skenaariossa voi tarkoittaa mm. sitä, että jäljelle jää entistä laadukkaampaa ja ympäristöllisesti kestävämpää maataloustuotantoa, joka myös hinnoitellaan entistä korkeammalle. Toisin sanoen se osa, joka nykyisestä (2019) maataloustuotan-

nosta, kotieläintuotanto selvästi supistettuna jäljelle jää, pystyy toimimaan lähes ilman tukia vuonna 2050. Jäljelle jäävä osa tukia voidaan maksaa viljelijöille ympäristöperusteisina ja ilman tuotantoa ja markkinoita vääristäviä vaikutuksia.

Nousevat maataloustuotteiden hinnat ja toisaalta vähenevä kotimainen kulutus tekevät vähitellen tarpeettomiksi kansalliset tuotantosidonnaiset tuet, samoin kuin EU-järjestelmän (CAP) mukaiset tuotantosidonnaiset tuet kotieläimille ja valkuaiskasveille. Tähän myötävaikuttavat nouseva satotaso ja tuotannon keskittyminen suurille ja kustannustehokkaille maataloille. Tällöin tuen maksaminen ei vaikuta tuotantopäätöksiin muuten kuin varmistamaan tärkeiden ekosysteemipalvelujen ylläpitoa, joita tuotettaisiin markkinaehtoisesti vähemmän kuin ilman ympäristöhyödyistä maksettavaa tukea. Tämä voisi tarkoittaa mm. sitä, että nykyisen kaltaisia ympäristö- ja epäsuotuisten alueiden tukia jää osin jäljelle, joskin maksettuna selvästi pienentyneelle viljelypinta-alalle.

Koska ympäristötietoisuus on Jatkuva kasvu-skenaariossa vahvaa, ympäristöperusteisten tukien (esim. ympäristökorvaus) määrä kasvaa 50 % asteittain 2021–2045. Pinta-alalle maksettavat tuotannosta riippumaton CAP-pinta-alatuki vähenee 100 % asteittain 2021–2045. Samassa ajassa epäsuotuisten alueiden ns. LFA-tuen perusosa (noin 200 eur/h) vähenee puoleen vuoteen 2045 mennessä. Kotieläintiloille maksettava LFA-tuen lisäosa (80 eur/ha) pysyy ennallaan. LFA-tuki alenee näin 40 % asteittain. Jatkuva kasvu-skenaariossa oletetaan, että asenteet ovat laajasti hyvin ympäristömyönteiset, jolloin tuotannon intensiteetin tuomia haittoja ja riskejä on jollain tavalla hillittävä. Sen vuoksi oletetaan, että osaltaan laajaperäisempään tuotantotapaan ohjaavan ympäristöperustein maksettavan tuen (nykyinen ympäristökorvaus) kasvaa 50 % vuoteen 2045. LFA-tuen lisäosa kotieläintiloille (80 eur/ha) säilyy ennallaan ja ohjaa myös laajaperäisempään tuotantotapaan kotieläintiloilla muiden maataloustukien merkittävän alenemisen vastapainoksi. CAP-tuotantosidonnaiset tuet ja kansalliset tuotantosidonnaiset tuet lakkaavat asteittain kokonaan vuosina 2021–2045 (ks. Taulukko 7).

Taulukko 7. Maataloustukien muutokset (%) vuosina 2021–2045 eri skenaarioissa (keskimääräiset tuet 2014–2020 arvioita perustuen Lehtonen & Niemi 2018).

	WEM	Jatkuva kasvu	Säästö
CAP-tuki, tuotannosta riippumaton	kuten 2014–2020: 430 M€	-100 % (-430 M€)	-10 % (-43M€)
CAP-tuki, tuotantosidon-nainen	kuten 2014–2020: 95 M€	-100 % (-95 M€)	-30 % (-32 M€)
LFA-tuki	kuten 2014–2020: 550 M€	-40 % (-200 M€)	kuten 2014–2020
Ympäristökorvaus	kuten 2014–2020: 300 M€	+50 % (+150 M€)	kuten 2014-2020
Kansallinen tuki	kuten 2014–2020: 330 M€	-100 % (-330 M€)	-30 % (-110 M€)
Investointituet	kuten 2014–2020: 100 M€	100 M€	100 M€
Yhteensä	kuten 2014–2020: 1800 M€	-50 % (-900 M€)	-10 % (-185 M€)

EU:n kokonaan maksamat pilarin 1 tuet, eli peltoalalle maksettava tuotannosta irrotettu tuki (noin 200 eur/ha) ja tuotantosidonnaisesti pääosin kotieläintuotannolle maksettava tuki (noin 20 % pilarin 1 CAP-tuista) lakkaavat vähitellen kokonaan vuoteen 2045 mennessä. Samoin käy kansallisille kotieläintuille, jotka maksetaan tuotantoperusteisesti. LFA-tuen perusosa (noin 200 eur/h) vähenee puoleen vuoteen 2045 mennessä. Nämä muutokset tarkoittavat sitä, että kotieläinten tuotantoon vaikuttavia tukia ei enää makseta vuodesta 2045.

Uuden teknologian avulla maataloustuotanto tehostuu kivennäismailla ja loppuu lähes kokonaan turvemailta, jotka valjastetaan tehokkaasti kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Keinoina ovat metsitys ja kosteikkojen perustaminen. Lähes kaikki turvemaa, yli 200 000 ha, poistuu viljelykäytöstä. Noin 30 000 ha jää säättösalojitettuna tehokkaaseen viljelykäyttöön, jolloin kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 40 % alemmat kuin tavanomaisesti ojitetulla pellolla. Myös osa kivennäismaita, noin 400 000 ha, jää viljelemättä rehun tarpeen vähentyessä. Tästä alasta noin 300 000 ha metsitetään ja osa jää muuhun käyttöön mm. voimakkaan kaupungistumisen seurauksena.

Suurten, yli 100 lehmän suuruusluokan maatilojen karjanlanta hyödynnetään 50-prosenttisesti biokaasuntuotannossa. Tähän käytetään myös ylijäämänurmista saatua lisäsyötettä energiantuotannon ja kannattavuuden parantamiseksi.

4.6.3 Säästö-skenaario maatalouden osalta

Pitko-raportissa (Koljonen et al. 2019a) Säästö-skenaarion pääperiaatteina ovat: "Säästäminen, itse tekeminen ja vähähiilisyys trendikästä, kuluttamalla vaikuttaminen". Tällöin "Kierto- ja materiaalitalous, jakamistalous, 'raskas' teollisuus ovat merkittävässä roolissa". Pitko-raportin mukaan sidosryhmien työpajoissa päädyttiin seuraavanlaiseen luonnehdintaan maataloudesta Säästö-skenaariossa: "Maa- ja

metsätalous kiertotalouden edistäjänä. Neitseellisten raaka-aineiden käytöstä verotetaan. Ruoan tuotannossa korostuu omavaraisuus. Kasvisruuan ja kaupunki-maatalouden /tilamyynnin edistäminen digitalouden avulla. Kasvissyöntiä edistetään eläinproteiiniveron, elintarvikkeiden sertifiointin, kasvissyönnin terveellisyydestä ja valistamisen keinoin. Ruokahävikki poistetaan lähes kokonaan biojäteverolla. Maataloudelle asetetaan hiilivero. Lannasta ja nurmesta tuotetaan biokaasua.”

Kotieläintuotteiden (lukuun ottamatta kananmunia) kulutus vähenee keskimäärin noin 30% vuoteen 2050 (-15 % vuoteen 2035; ks. Taulukko 6). EU:n suoria tuotantopäätöksistä irrotettuja maataloustukia vähennetään 10 % vuosina 2021–2045. Kotieläintuotannon tukia maidolle, lypsylehmille ja muulle nautakarjalle vähennetään 30 % vuosina 2021–2045. LFA-tuki ja ympäristötuki säilyvät ennallaan. Laajamittainen biokaasun tuotanto kattaa 2050 noin puolet kotieläinten lannasta ja tähän on mahdollisuuksia kotieläintilojen koon ja biokaasun rakentamiseen myönnettävien tukien ja kierrätysravinnemarkkinoiden kannustaessa (ks. Taulukko 7).

4.6.4 Eri skenaarioiden vaikutus Suomen maatalouteen vuoteen 2050

WEM-skenaariossa lähtötilanteessa 2014–2018 maatalouden heikko kannattavuus jatkuu. Rakennekehityksen ansiosta maatalouden tuotanto säilyy likimain ennallaan lukuun ottamatta pientä vähenemistä naudanlihan ja viljan tuotannossa. Maidontuotannon kehitys jatkuu likimain ennallaan, vaikka kannattavuus on viime vuosina heikentynyt. Tähän myötävaikuttavat nopea rakennekehitys ja tuotannon keskittyminen vähitellen suurille yli 100 lehmän tiloille, joilla kustannukset ovat vähän alemmat kuin pienemmillä tiloilla. Tätä pienempiä maitotiloja jatkaa kuitenkin edelleen paljon tuotannossa. Tulokset ovat tässä mielessä samansuuntaisia kuin tutkimuksessa Lehtonen et al. (2017). Tulokseksi saatu pieni maidontuotannon nousu vuoden 2040 jälkeen on epävarma ja riippuu vahvasti tehdyistä hinta- ja tuottavuusoletuksista. Kaiken kaikkiaan voidaan sanoa, että maidontuotannossa rakenne- ja muu tuottavuuskehitys ylläpitää entisenlaista tuotannon tasoa aina vuoteen 2050 asti, mutta naudanlihan tuotanto, joka alittaa kotimaisen kysynnän yli 20 prosentilla (tilanne 2018), vähenee suurella todennäköisyydellä vähintään 30 % alle kotimaisen kulutuksen vuoteen 2050 WEM-skenaariossa. Kannattavuus ei ole riittävän hyvä emolehmäpohjaisen naudanlihan tuotannon laajamittaiseen lisäämiseen.

Aktiivisessa tuotantokäytössä oleva peltoala vähenee 2020-luvulla WEM-skenaariossa noin 200 000 ha (-10 % vuodesta 2018; tämä ala voi kuitenkin säilyä suurelta osin maataloustukien piirissä). Tämä johtuu viljanviljelyn kannattavuuden alhaisesta lähtötasosta, energian ja lannoitteiden hintojen noususta 2020-luvulla, ja siitä seuraavasta tuotannon keskittämisestä keskimääräistä korkeamman satotason viljelysmaille. Esimerkiksi lypsy- ja muussa nautakarjataloudessa keskitytään korkeampien kustannusten vallitessa aiempaa korkeamman satotason nurmiviljelyyn, jolloin alhaisen satotason ja lannoitekäytön nurmiala vähenee. Vastaavanlaista tapahtuu viljantuotannossa, joka vähenee kuitenkin suhteessa vähemmän kuin viljanviljelyssä oleva peltoala. Kokonaisuutena keskimääräistä heikkotuottoisempaa peltoa jää maksettavista maataloustuista huolimatta suhteellisesti eniten maan itä- ja pohjoisosissa, mutta myös muualla maassa.

Kotieläintalouden tuotanto vähenee likimain kotimaista kulutusta vastaavasti Jatkuva kasvu -skenaariossa. Näin tapahtuu etenkin sika- ja siipikarjanlihan tuotannossa. Sen sijaan maidontuotanto vähenee selvästi kotimaista maitotuotteiden kulutusta (-50 %) vähemmän, noin 30 % vuoteen 2050. Tähän myötävaikuttaa ennen muuta nousevat hinnat maailmanmarkkinoilla sekä tuotannon tehostuminen.

Myös Säästö-skenaariossa maidontuotannon väheneminen jää kotimaista kulutusta vähäisemmäksi. Tähän eivät ole syynä nousevat maailmanmarkkinahinnat (jotka oletetaan vakaiksi kuten myös WEM-skenaariossa), vaan kotieläintalouden tehostuminen ja kustannusten lievä aleneminen laajamittaisen biokaasun tuotannon ja apilanurmien tehokkaan hyödyntämisen ansiosta. Maidontuotanto kuitenkin alenee noin 20 % maitotuotteiden kotimaisen kulutuksen vähentyessä 30 % vuoteen 2050. Vuoteen 2035 mennessä muutokset kotieläintuotannossa jäisivät suhteellisen pieniksi, noin puoleen 2050 tilanteesta.

Lihantuotanto seuraa Säästö-skenaariossa kotimaisen kulutuksen muutosta, koska lihatuotteiden vienti ei kasva tai kasvaa vain vähän joissakin tuoteryhmissä. Tähän kehitykseen vaikuttavat osaltaan maltillinen maailmanmarkkinahintojen kehitys, joka heijastuu EU:n sisämarkkinoille ja pitää yllä kotimaista kulutusta ja tekee viennistä heikosti kannattavaa. Samaan suuntaan vaikuttavat myös korkeat oma-varaisuustavoitteet, mikä tekee kotieläintuotteiden korvaamisesta ruokavalioidessa hitaampaa kuin Jatkuva kasvu -skenaariossa. Maataloustuotanto suuntautuu Säästö-skenaariossa pääosin kotimarkkinoille ja perustuu aiempaa enemmän paikallisten tuotteiden suosimiselle, resurssien tehokkaalle hyödyntämiselle ja kiertotalouteen. Apilanurmiseosten käyttöä tuetaan maataloudessa ja lannoiteverolla vähennetään lannoitteiden käyttöä. Lannoitevero 20 % alentaa typpilannoitusta noin 10 % ja kasvien satoja 2–5 %. Peltoa tarvitaan kuitenkin aiempaa vähemmän kotieläintuotannon ja sen rehuntarpeen vähenemisen vuoksi.

Satotaso nousee Jatkuva kasvu -skenaariossa 10 % kauttaaltaan lannoitusta lisäämättä, mikä voidaan saavuttaa parhaiden peltolohkojen kasvukunto ja tuotto-kyky huomioivalla viljelyllä, ja/tai tarkentamalla peltolohkokohtaista lannoitusta, ja/tai tarkentamalla myös peltolohkon sisäistä lannoitusta tarkkuusviljelyyn kehitettyjen (digitaalisten) tekniikoiden avulla. Satotason nousu yhdessä kotieläintuotannon vähenemisen kanssa vähentää erittäin merkittävästi peltoalan tarvetta Jatkuva kasvu -skenaariossa.

Jatkuva kasvu -skenaariossa Suomen maatalous tehostuu ja suuntautuu vähitellen aiempaa enemmän vientimarkkinoille, joilla myös kotieläintuotteiden kysyntä on edelleen vahvaa lähivuosisikymmeninä. Koska toistaiseksi Suomen maa- ja elintarviketuotanto on suuntautunut pääasiassa kotimaan markkinoille ja vain joiltain osin vientimarkkinoille (eräät maitojalosteet, kaura, kumina, eräät sikojen ruhonosat), viennin osuuden voi olettaa kasvavan vähitellen ja aluksi vain rajoitetussa määrässä tuoteryhmiä, lähinnä kotieläintuotteissa ja joissakin kasvituotteissa.

Aktiiviviljelyssä käytettävä peltoala vähenee Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaariossa rehualan tarpeen vähenemisen vuoksi. Palkokasvien alan kasvu (50 000–80 000 ha) on siihen nähden vähäinen.

Päätulokset maatalouden muutoksista:

- WEM: Pellon tarve vähenee noin 10 %: viljan ja nurmen viljelyn pinta-alat vähenevät; kotieläintuotanto lähes ennallaan
- Muut skenaariot: Pellon tarve vähenee noin 20–40 %, jos naudan-, sian- ja siipikarjanlihan ja maitotuotteiden kulutus vähenee 30–50 % vuoteen 2050; vuoteen 2035 mennessä noin puolet tästä
- Maidontuotanto ei vähene yhtä paljon kuin kotimainen kulutus, jos maailmanmarkkinahinnat nousevat (Jatkuva kasvu -skenaario)
- Broilerinlihan tuotanto vähenee saman verran kuin kotimainen kulutus, sianlihan tuotanto kulutusmuutosta enemmän
- Kotimaista tuotantoa voidaan ohjata ilmasto- ja ympäristösuuntaan kannustamalla esim. apilanurmien ja biokaasun hyödyntämiseen
- Nousevien energian ja lannoitteiden hintojen vastapainoksi tarvitaan tukea resurssitehokkaalle tuotannolle; tukiuudistukset
- Turvemaita vapautuisi maataloudesta: isoja päästövähennyksiä saavutettavissa, jos löydetäisiin sopivia kannustimia.

Maatalouden muutokset em. skenaarioissa johtavat myös suuriin muutoksiin maataloustulossa ja maataloustuotantoon kuluihin työtuntien määrässä (Taulukko 8). Jatkuva kasvu -skenaariossa perusmaatalouden (ei sisällä puutarha-, hevos-, turkis- ja kalataloutta, mutta sisältäen palkokasvituotannon) viljelijöille jäävä maataloustulo alenee noin puoleen vuodesta 2018 vuoteen 2050, Säästö-skenaariossa noin 35 %. Työtuntien määrä vähenisi likimain samassa suhteessa. Nämä laskelmat eivät kuitenkaan ota huomioon em. perusmaatalouteen kuulumattomien tuotannonalojen tuotantoa, joka todennäköisesti kasvaa. Niiden tuotannon, tulojen ja työvoiman tarve on kuitenkin lähtötilanteessa vain murto-osa perusmaatalouden vastavasta.

Taulukko 8. Suhteellisia muutoksia maataloudessa eri skenaarioissa vuoteen 2035 ja 2050.

Maidontuotanto				Tuotannon markkinahintainen arvo, muutos			
	WEM	Jatkuva kasvu	Säästö		WEM	Jatkuva kasvu	Säästö
2018	1	1	1	2018	1	1	1
2035	1,01	0,79	0,88	2035	0,95	0,89	0,9
2050	1,05	0,7	0,79	2050	0,96	0,82	0,88

Naudanlihantuotanto				Maataloustukien arvo, muutos			
	WEM	Jatkuva kasvu	Säästö		WEM	Jatkuva kasvu	Säästö
2018	1	1	1	2018	1	1	1
2035	0,87	0,64	0,76	2035	0,87	0,53	0,79
2050	0,84	0,52	0,65	2050	0,85	0,35	0,72

Sianlihantuotanto				Maataloustulon muutos			
	WEM	Jatkuva kasvu	Säästö		WEM	Jatkuva kasvu	Säästö
2018	1	1	1	2018	1	1	1
2035	0,87	0,65	0,75	2035	0,74	0,58	0,65
2050	0,86	0,42	0,62	2050	0,74	0,5	0,65

Siipikarjanlihantuotanto				Perusmaatalouden työtunnit, muutos			
	WEM	Jatkuva kasvu	Säästö		WEM	Jatkuva kasvu	Säästö
2018	1	1	1	2018	1	1	1
2035	0,98	0,75	0,86	2035	0,85	0,65	0,75
2050	0,98	0,5	0,7	2050	0,79	0,5	0,61

4.6.5 Maatalouden muutosten vaikutus maankäyttöön

Kokonaisuutena peltomaata vapautuu jonkin verran muuhun käyttöön, erityisesti turvemaiden osalta. Tämä toteutuu laajassa mittakaavassa Säästö-skenaariossa, jossa turvemaista noin 100 000 ha jää maataloustuotannon piirin osin säätösalaojitettuna (30 000 ha; 30 %), mikä vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Maatalouskäytössä olleista turvemaista metsitetään noin 100 000 ha ja noin 50 000 ha otetaan bioenergian tuotantoon (esim. paju, hieskoivu ym.). Kivennäismaita vapautuu maatalousmaasta noin 200 000 ha (Taulukko 9).

Säästö-skenaariossa osa peltoalasta kuitenkin jää aiempaa kestävämmän kotieläintuotannon piiriin (myös turvemaidella, joilla osin säätösalaojitusta), joka tuottaa myös merkittävästi biokaasua liikennekäyttöön sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Energiasektorilla laskettavat päästövähennykset maatalouden karjanlannan hyödyntämiseen perustuvan biokaasun ansiosta jäävät Säästö-skenaariossa

kuitenkin vähäisiksi, alle 0,3 Mt CO₂-ekv. suuruiseksi (Jatkuva kasvu -skenaariossa alle 0,2 Mt CO₂-ekv.). Kotieläintalouden noin 20 % vähenemisen vastapainoksi kasvintuotanto monipuolistuu ja puutarhatuotanto lisääntyy Säästö-skenaariossa, etenkin maan eteläosissa, jossa monipuolisemmat viljelykierrot lisäävät maan hiilipitoisuutta (tätä ei huomioitu KHK-päästöjen laskennassa). Maan keski- ja pohjoisosissa myös kivennäismaita jää paikoin viljelemättä ja ne metsitetään. Näin etenkin Jatkuva kasvu -skenaariossa, missä peltomaata tarvitaan kolmannes vähemmän kuin 2018. KHK-päästöjen kannalta on tällöin olennaista se, mitä maataloudesta vapautuvalle peltomaalle tehdään. Tämän on myös suuri ympäristöllinen, yhteiskunnallinen ja aluetaloudellinen kysymys.

WEM-skenaariossa vapautuu jo yli 200 000 ha peltomaata maataloustuotannosta vuoteen 2050. Tästä yli 100 000 ha toteutuisi tulosten mukaan jo 2020-luvulla jos tuotantopanosten hintojen nousu toteutuu eikä maataloustuotteiden hinta nouse tätä enemmän. Heikko kannattavuus ja kustannuspaineet ajavat tehostamiseen: huonosti tuottavaa peltoa jää pois tuotannosta, mutta säilyy maatalousmaana nykyisellä maatalouspolitiikalla tuotannosta riippumattomien peltoalatukien vuoksi. Olennaista Säästö- ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa on se, että peltoalan tarpeen väheneminen ja sitä vastaava maataloustukien vähentäminen tekee mahdolliseksi vapautuvan peltomaan ottamisen KHK-päästöjen ohjelmalliseen vähentämiseen.

Turvemaista, joista osa on hyvinkin maataloustuotantoon ja erityisesti lypsykarjan rehuntuotantoon soveltuvaa, 60 000 ha on edelleen maatalouskäytössä Jatkuva kasvu-, ja 100 000 ha Säästö-skenaariossa vuonna 2050. Molemmissa skenaarioissa 20 000 ha turvemaita perustetaan kosteikoiksi. Säästösaloitukseen investoitaisiin Jatkuva kasvu-skenaariossa 20 000 hehtaarin ja Säästö-skenaariossa 30 000 hehtaarin alalla. Loput turvemaista metsitetään näissä skenaarioissa, johon tarvittavia kustannuksia ja mahdollisia tukia ja avustuksia ei ole täsmennetty. Nopeakiertoiseen puumassaan (paju, hieskoivu ym.) perustuvaan bioenergiantuotantoon – lantaan perustuvan biokaasutuotannon lisäksi - otetaan maataloustuotannolta vapautuvasta peltoalasta 43 000 ha Jatkuva kasvu-skenaariossa ja 150 000 ha Säästö-skenaariossa. Nämä maatalouden muutoksista johtuvat maankäytön muutokset vaikuttavat kasvihuonekaasupäästöihin LULUCF-sektorilla (ks. taulukko 9).

Taulukko 9. Maatalouden muutoksen mahdollistama maankäytön muutos eri skenaarioissa.

MAANKÄYTÖN MUUTOS PELTO-MAILLA YHTEENSÄ (ha)	WEM	Jatkuva kasvu	muutos, ha per vuosi 2021–2050	Säästö	muutos, ha per vuosi 2021–2050
Viljelysmaana 2018	2 489 200	2 489 200		2 489 200	
Aktiivisessa viljelyssä 2018	2 271 500	2 271 500		2 271 500	
Aktiivisessa viljelyssä 2050	2 000 000	1 471 500	-26 667	1 871 500	-13 333
Viljelysmaana 2050	2 488 200	1 674 400	-27 067	2 016 200	-15 767
Tästä sääätösala- ojitukseen turve- mailla	< 5 000 ha	20 000	667	30 000	1 000
Kosteikoiksi (maata- lousmaalla)	0	20 000	667	20 000	667
Bioenergiaksi	0	43 000	1 433	150 000	5 000
Metsitykseen	24 600	526 900	17 563	171 300	5 710
Muu käyttö	98 200	263 800	8 793	170 800	5 693
Viljelyksessä olevan peltoalan muutos, ha	-1 000	-812 000	-26 667	-473 000	-15 767

4.6.6 Maatalouden suuret muutokset mahdollisia

Maatalouden tuotantokäytöstä pois jäänyttä peltoa on jo nyt käytettävissä metsitykseen tai muihin KHK-päästöjä vähentäviin toimiin. Tukikelpoista peltoalaa on yli 200 000 ha vähemmän kuin KHK-inventaariossa pelloksi luokiteltavaa maa-alaa. Lisäksi maataloustukien piirissä olevista turvepelloista 13 % eli 30 000 ha ei ole tuotantokäytössä (Kekkonen et al. 2019). Myöskään kivennäismaista kaikki pellot eivät ole välttämättömiä maataloustuotannolle sen nykyisessä muodossaan. Osa tuotannossa hyödynnetystä nurmialasta on laajaperäisiä yhden niiton nurmia ja vain osalla 2–3 niittoa ja sato yli 10 000 kg ka/ha. Kuivuuden ja muiden syiden takia huonojen rehuvuosien varalle tarvitaan kuitenkin puskurialaa niin viljan kuin nurmenkin tuotannossa. Nurmirehun riittävyys on maito- ja nautakarjailoille kriittisen tärkeää. Syyinä keskimäärin alhaisiin nurmi- ja viljasatoihin on myös se, että osa viljelijöistä viljelee vähin panoksin isoja satoja tavoittelematta, koska hintasuhteet eivät siihen kannusta. Lisäksi maataloustuet ja niiden ehdot pitävät huonoakin peltoa tuotannossa. Tällöin maataloudesta tulee enemmän KHK-päästöjä kuin tuotanto edellyttäisi, etenkin turvemilla.

Mikäli maataloudessa tarpeettomia maatalousmaita lähdetään ohjaamaan päästövähennysten aikaansaamiseen, se voi onnistua aiempaa helpommin myös WEM-skenaariossa jo lähivuosisikymmeninä. Heikko kannattavuus ja kustannuspaineet

sekä maatalouden rakennekehitys, jossa kaikkien maatilojen määrä laskee, ohjaavat jo sinällään tuotantoa parhaille viljelysmaille, jolloin huonoimpia ja syrjäisimpiä peltoja jää vähitellen viljelyn ulkopuolelle peltoalatuista huolimatta. Maataloustukia ei voida tuotannosta poistuneille huonossa viljelykunnossa oleville pelloille maksaa, mutta muuta kautta voidaan kannustaa päästövähennyksiin pelloilla, joita ei enää viljellä. Jos päästövähennyksiin kannustetaan, niitä voidaan saavuttaa peltojen osalta maankäytön muutoksin jo nykytilanteessa ja WEM-skenaariossa erityisesti turvemilla.

Jos ruokavaliot muuttuvat kasvipainotteiseen suuntaan, rehun ja pellon tarve vähenyvät. Silloin voidaan päästä lähivuosisikymmeninä jo huomattaviin kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiin. Se kuitenkin edellyttää, että kannustimet tarvittavaan maankäytön muutokseen ovat maanomistajien ja viljelijöiden näkökulmasta tuntuvia ja pitkäaikaisia. Koska maatalouden kannattavuus on pääosin heikko eikä ole lähivuosina olennaisesti paranemassa, osa huonommista pelloista voi siirtyä pois maatalouden käytöstä kohtuullisin kustannuksin ja niiden kompensatioin.

Isot muutokset maataloudessa ja peltoalassa vaikuttavat laajalti yhteiskuntaan, ja nämä vaikutukset osuvat eri väestöryhmiin ja alueisiin hyvin epätasaisesti. Suurilla muutoksilla maataloustuotannossa ja pellonkäytössä on merkittäviä paikallisia aluetaloudellisia ja työllisyysvaikutuksia etenkin alueilla, joilla maatalous perustuu turvemaiden käyttöön.

Ruokaturvan ylläpitäminen kotimaista kysyntää ja sen muutosta vastaavalla tasolla edellyttää kaiken aikaa panostuksia maatalouden rakennemuutokseen, tuotavuuteen, osaamiseen ja koko kotimaisen ruokaketjun kilpailukykyyn. Tämä tarkoittaa mm. sitä, että jos käytössä oleva peltoala supistuu ja sitä ohjataan ilmasto- ja eri ympäristötavoitteiden saavuttamiseen, tuotantoon jäävän peltoalan kasvukunnosta on entistä tärkeämpää huolehtia. Sään ääri-ilmiöt ja markkinoiden ja hintojen vaihtelut eivät suurella todennäköisyydellä ole vähenemässä vaan voimistumassa. Samalla kun ruuan globaali kysyntä kasvaa erityisesti proteiinia runsaasti sisältävien tuotteiden osalta, globaalin ja eurooppalaisen ruokaturvan haasteet kasvavat. Tämä on otettava huomioon myös KHK-päästöjen vähennystoimia suunniteltaessa.

4.7 Maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous (LULUCF)

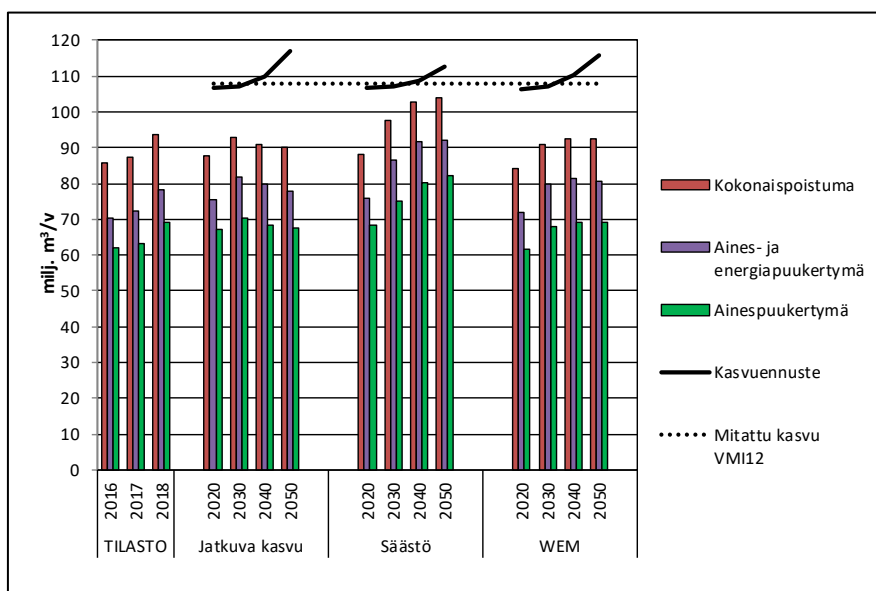
4.7.1 Metsän kasvu ja hakkuut eri skenaarioissa

Harri Kilpeläinen ja Hannu Hirvelä (Luke)

Skenaarioille ennustetut runkopuun kokonaispoistumat ja hakkuukertymät on esitetty alla kuvassa 13 koko maan osalta. Runkopuun kokonaishakkuukertymä, joka sisältää hakkuissa metsäteollisuudelle käyttöön ohjautuvan ainespuun ja energiakäyttöön päätyvän runkopuun (ml. kotitalouksien polttopuu), on kaikissa skenaarioissa alhaisimmillaan ensimmäisellä kymmenvuotijaksolla (vuosina 2015–2024), jolloin aines- ja energiarunkopuuta korjataan vuosittain WEM-skenaariossa noin 72

miljoonaa m³ sekä Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaariossa lähes 76 miljoonaa m³. Nämä skenaarioiden ensimmäisen kymmenvuotiskauden hakkuiden tasot ovat lähellä vuosien 2016–2018 tilastoituja runkopuun kokonaishakkuukertymiä (70–78 milj. m³/v) (Luke 2019a).

Kaikissa skenaarioissa runkopuun vuotuinen kokonaishakkuukertymä nousee vuosina 2025–2034 vähintään 80 miljoonan m³:n tasolle. Jatkuva kasvu-skenaariossa aines- ja energiarunkopuun hakkuukertymä on vuosina 2025–2034 maksimitasolla (81,8 milj. m³/v), mutta vuodesta 2035 alkaen tässä skenaariossa vuotuinen runkopuun hakkuiden taso laskee hieman alle 80 miljoonan m³:n. Sen sijaan WEM-skenaariossa runkopuun vuotuinen kokonaishakkuukertymä pysyy vuosien 2025–2054 aikana tasaisena 80–81 miljoonassa m³:ssa. Säästö-skenaarioissa runkopuun kokonaishakkuukertymä on vuosina 2035–2054 selvästi muita skenaarioita korkeampi, vuosittain noin 92 miljoonaa m³.

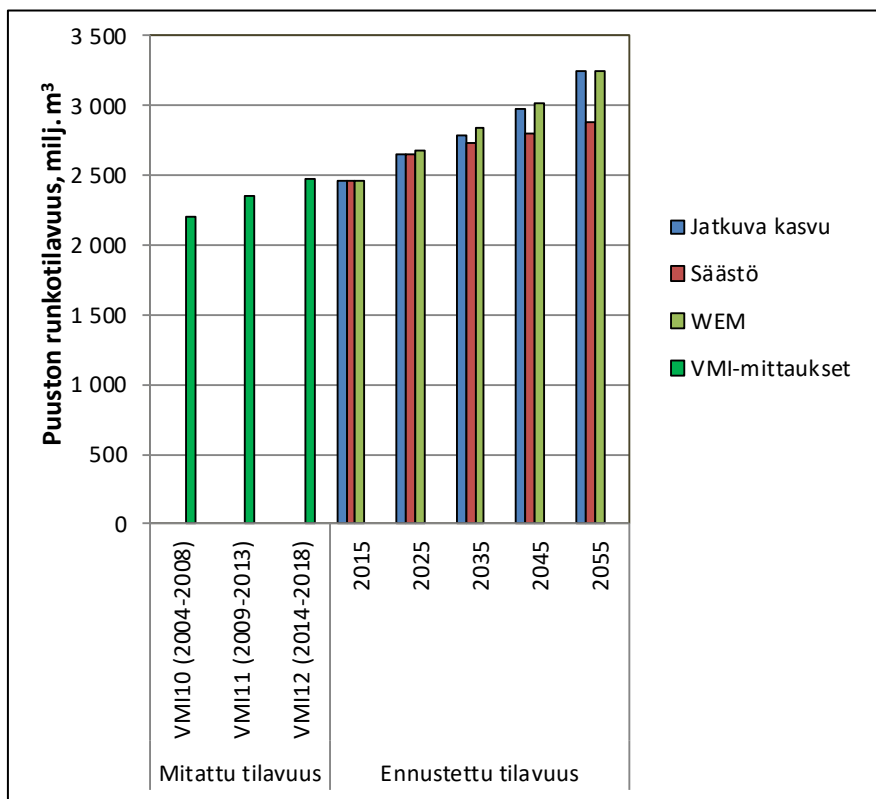


Kuva 13. Tilastoidut ja skenaarioille ennustetut runkopuun kokonaispoistumat ja hakkuukertymät sekä skenaarioille ennustetut runkopuun kokonaiskasvut metsä- ja kitumailla vuosina 2015–2054 (kuvassa ennustejaksojen keskivuodet). Tilastoidut poistumat ja kertymät vuosilta 2016–2018 perustuvat Luken tilastoihin (Luke 2019a). Skenaariokohtaiset poistuma- ja kertymäennusteet on laskettu MELA2016-ohjelmistolla VMI11-12-inventointitietoihin (mittausvuodet 2013–2017) perustuen. Kuvaa on lisäksi merkitty pisteviivalla VMI12-aineistoon (mittausvuodet 2014–2018) perustuva puuston vuotuinen kokonaiskasvu (Luke 2019b).

Myös energiapuun kokonaiskorjuumäärä on vuosina 2015–2024 alhaisimmillaan (14–17 milj. m³/v skenaariosta riippuen), mutta vuodesta 2025 lähtien vuoteen 2054 energiapuuta korjataan kaikissa skenaarioissa vuosittain 19–20 miljoonaa m³. Vuosittain korjattava energiारunkopuun määrä vaihtelee 7–12 miljoonassa m³:ssa sekä energiapuuhun päätyvien oksien ja kantojen yhteenlaskettu määrä 7–10 miljoonassa m³:ssa ajanjaksosta ja skenaariosta riippuen (Liite C). Kotitalouksien poltto-
puuksi hakattavan aineskokoisen energiारunkopuun kertymä on kaikissa skenaarioissa 5–6 miljoonaa m³ vuodessa.

Runkopuun kokonaispoistuma, joka sisältää hakkuukertymän ohella luonnonpoistuman sekä taimikonhoidossa ja hakkuissa metsään jäävän runkopuun, on vuosina 2015–24 Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaarioissa noin 88 miljoonaa m³/v ja WEM-skenaariossa 84 miljoonaa m³/v (Kuva 13). Säästö-skenaariossa vuotuinen kokonaispoistuma vuosina 2035–2054 nousee 103–104 miljoonaa m³:iin, kun Jatkuva kasvu- ja WEM-skenaariossa vuotuinen kokonaispoistuma on vastaavalla ajanjaksolla hieman yli 90 miljoonaa m³.

Puuston kokonaiskasvut metsä- ja kitumailla pysyvät skenaarioissa aina vuoteen 2035 asti hyvin lähellä toisiaan, noin 107 miljoonassa m³/v (Kuva 13). Tämän jälkeen puuston vuotuiset kokonaiskasvut nousevat kymmenvuotiskausittain ollen vuosina 2045–2054 Säästö-skenaariossa 112,7 miljoonaa m³, WEM-skenaariossa 115,7 miljoonaa m³ ja Jatkuva kasvu-skenaariossa 117,1 miljoonaa m³. Erot runkopuun hakkuukertymätasossa skenaarioiden välillä alkavat näkyä puuston kasvulu-
vuissa merkittävästi vasta kahdella viimeisellä kymmenvuotisjaksolla (vuosina 2035–2054). Puuston kokonaistilavuuden kehitys jatkuu tasaisena metsä- ja kitumailla vuodesta 2015 vuoteen 2055 (Kuva 14) ollen Jatkuva kasvu- ja WEM-skenaarioissa vuonna 2055 yli 3,2 miljardia m³ sekä Säästö-skenaariossa vajaa 2,9 miljardia m³. Liitteessä C on esitetty tarkemmin MALUSEPO-skenaarioissa puuston runkotilavuuden, kasvun ja hakkuukertymän kehitys vuosina 2015–2055.



Kuva 14. Puuston kokonaistilavuus VMI10-, VMI11- ja VMI12-mittausten mukaan (Luke 2019c) sekä ennustettu puuston kokonaistilavuuden kehitys eri MALUSEPO-skenaarioissa.

4.7.2 Maankäytön muutokset eri skenaarioissa

Markus Haakana ja Tarja Tuomainen (Luke)

Viljelysmaan pinta-alan oletetaan pysyvän WEM-skenaariossa nykyisellä tasolla. Viljelysmaan pinta-ala toimi siten rajoitteena, jos historiatietoon perustuvien maankäytön muutosten seurauksena peltopinta-ala olisi alkanut joko kasvaa tai vähetä merkittävästi. Muutokset ruohikkoalueiden ja muun maankäytön välillä tapahtuvat aiemman kehityksen mukaisesti.

Kosteikot-luokkaan kuuluvan turvetuotannon kokonaisala pienenee runsaasta 100 000 hehtaarista 50 000 hehtaariin vuoteen 2050 mennessä. Turvetuotannon ala muuttuu suhteessa energiaturpeen käyttöön kuitenkin niin, että ympäristöturpeen ala ei vähene. Muiden kosteikkojen pinta-ala kehittyy historiatiedon mukaisesti. Tähän kuuluvat muun muassa ojitetut vähäpuustoiset ja/tai huonotuottoiset

metsämaat, joiden ojitusta ei pidetä kunnossa tai metsälain mukaisesti uudistamistoimia ei edellytetä tehtäväksi uudistushakkuun jälkeen (ns. virheojitukset), ja jotka siten siirtyvät kosteikoiksi.

Rakennetun maan ala kasvaa 1,5 milj. hehtaarista 1,8 milj. hehtaariin vuoteen 2050 (Taulukko 10) mennessä. Rakennetuksi maaksi siirtyy muista maaluokista 9 000–13 000 ha vuodessa, keskimäärin 11 000 ha vuodessa. Rakennetun maan alan kehityksessä on huomioitu myös aurinkovoiman ja tuulivoiman rakentaminen.

Muu maa -luokan muutokset ovat historiatiedon mukaiset ja sen pinta-ala vähennee pääasiassa rakentamisen seurauksena.

Metsämaan kokonaispinta-ala muuttuu sen mukaan, kuinka paljon alueita siirtyy muuhun käyttöön ja paljonko metsitetään. Edellä kuvatuilla oletuksilla metsämaan ala pienenee vuoden 2015 21,9 milj. hehtaarista 21,6 milj. hehtaariin vuonna 2050. Uutta metsämaata syntyy metsittämällä ja metsittymällä vuoteen 2050 mennessä vajaa 200 000 ha eli noin 6 000 hehtaaria vuodessa. Metsämaata otetaan muuhun käyttöön keskimäärin 14 000 hehtaaria vuodessa, muutosala pienenee aikasarjan loppua kohti ja on 12 000 hehtaaria vuonna 2050.

Jatkuva kasvu -skenaariossa merkittävin ero WEM-skenaarioon on viljelysmaan pinta-alan pieneminen 2,5 milj. hehtaarista 1,7 milj. hehtaariin. Viljelysmaan alasta vajaa 530 000 ha metsitetään ja vajaa 310 000 ha siirtyy muuhun maan käyttöön jaksolla 2021–2050. Säästö -skenaariossa viljelysmaiden metsitysala on 270 000 ha, samoin muuhun maankäyttöön siirtyvä ala 220 000 ha. Vastaavasti uutta viljelysmaata otetaan käyttöön alle 1000 ha vuodessa kummassakin skenaariossa. Bioenergiakasvien viljelyala kasvaa nykyisestä 10 000 ha:sta 43 000 ja 150 000 hehtaariin Jatkuva kasvu- ja Säästö -skenaarioissa. Jatkuva kasvu -skenaariossa bioenergiakasvit ovat turvemaiilla ja Säästö -skenaariossa kolmannes alasta tulee turvemailta. Jatkuva kasvu -skenaariossa ala hieman pienenee vuodesta 2040 ja se metsitetään. Viljelysmaiden pinta-alakehitystä on esitelty taulukossa 10.

Viljelysmaiden pinta-alan pieneminen WEM-skenaarioon nähden näkyy ruohikkoalueiden ja metsämaan alojen kasvuna. Lisäksi on huomioitava turvetuotantoalojen voimakas vähentyminen. Se ei vaikuta muiden maaluokkien aloihin näkyvästi, sillä turvetuotantoalaa oli lähtötilanteessa vain noin 100 000 ha. Turvetuotantoalaa jää jäljelle vuonna 2050 yhteensä 53 000 ha, 12 000 ha ja 5 000 ha WEM, Jatkuva kasvu - ja Säästö-skenaarioissa. Nämä alat sisältyvät taulukon 10 kosteikot-luokkaan.

Rakennetun maan kokonaispinta-alat poikkeavat eri skenaarioissa melko vähän, mutta rakentamisen taso on alhaisempi Säästö-skenaariossa. Jatkuva kasvu ja Säästö-skenaarioissa aurinko- ja tuulivoiman tuotannon vaatima pinta-ala vuonna 2050 on kokonaisuudessaan kaikkiaan noin 20 000 ha, joka on noin prosentti rakennetun maan kokonaisalasta.

Vuosina 2021–2050 metsäkatoala on kaikkiaan noin 320 000 ha Jatkuva kasvu -skenaariossa. Ala vaihtelee 12 000 hehtaarista aikasarjan loppupuolen 9 000 hehtaariin, keskimäärin vajaa 11 000 hehtaaria vuodessa. Rakennettuun alaan siirtyy keskimäärin 9 000 hehtaaria vuodessa ja muihin maaluokkiin melko tasaisesti likimain 500 hehtaaria vuodessa. Säästö-skenaariossa metsäkatoala on 250 000 ha

vastaavalla aikavälillä ja vuodessa noin 10 000 ha. Tästä rakennettuun maahan siirtyy 8 000 ha vuodessa. WEM-skenaariossa metsäkatoala on keskimäärin 14 000 ha vuodessa. Muita skenaarioita noin 3 000–4 000 ha suurempi metsäkatoala WEM-skenaariossa johtuu ennen kaikkea pellon raivauksesta ja myös uusista turvetuotantoalueista. WEM-skenaariossa 20 % metsäkatoalasta on orgaanisilla mailla, Jatkuva kasvu - ja Säästö-skenaarioissa vastaavasti 10 %. Tarkempi luokitelu on esitetty Aakkula et al. 2019 julkaisun liitetaulukoissa.

Metsitysalaista suuri osa tulee ruohikkoalueiden ja turvetuotantoalueiden metsityksestä. Orgaanisen maan osuus tästä on hieman alle puolet. Jatkuva kasvu-skenaariossa metsitysala on WEM:iä huomattavasti suurempi, 23 000 ha vuodessa, josta kolmannes orgaanisilla mailla. Suurempi ala johtuu lähinnä viljelysmaiden metsittämisestä. Säästö-skenaariossa metsitysala on vuosina 2021–2050 keskimäärin 15 000 ha.

Taulukko 10. Pinta-alojen kehitys eri skenaarioissa.

WEM									
1000 ha	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metsämaa	21 943	21 888	21 861	21 817	21 771	21 727	21 687	21 653	21 624
Viljelymaa	2 474	2 486	2 489	2 491	2 491	2 489	2 488	2 488	2 488
Ruohikko- alueet	238	241	243	244	245	245	246	247	249
Kosteikot	2 989	2 987	2 973	2 956	2 943	2 934	2 927	2 917	2 906
Rakennettu maa	1 432	1 476	1 517	1 574	1 631	1 683	1 731	1 774	1 813
Muu maa	1 312	1 311	1 310	1 309	1 308	1 307	1 306	1 305	1 305
Sisävedet	3 455	3 455	3 456	3 457	3 458	3 459	3 460	3 461	3 462
Yhteensä	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843

Jatkuva kasvu									
1000 ha	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metsämaa	21 943	21 888	21 880	21 937	21 994	22 051	22 112	22 186	22 264
Viljelymaa	2 474	2 486	2 486	2 353	2 219	2 085	1 952	1 814	1 676
Ruohikko- alueet	238	241	243	277	310	343	377	401	425
Kosteikot	2 990	2 986	2 952	2 937	2 923	2 912	2 902	2 891	2 881
Rakennettu maa	1 432	1 476	1 517	1 574	1 632	1 686	1 736	1 786	1 832
Muu maa	1 312	1 311	1 310	1 309	1 308	1 307	1 306	1 305	1 304
Sisävedet	3 455	3 455	3 456	3 457	3 458	3 459	3 460	3 461	3 462
Yhteensä	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843

Säästö

1000 ha	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metsämaa	21 943	21 888	21 864	21 885	21 904	21 930	21 958	21 985	22 017
Viljelymaa	2 474	2 486	2 486	2 408	2 331	2 251	2 171	2 092	2 013
Ruohikko- alueet	238	241	243	263	282	302	322	342	362
Kosteikot	2 990	2 986	2 967	2 949	2 932	2 915	2 899	2 890	2 881
Rakennettu maa	1 432	1 476	1 517	1 573	1 628	1 681	1 727	1 769	1 805
Muu maa	1 312	1 311	1 310	1 309	1 308	1 307	1 306	1 305	1 305
Sisävedet	3 455	3 455	3 456	3 457	3 458	3 459	3 460	3 461	3 462
Yhteensä	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843	33 843

5. Vaikutusarviot maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöihin

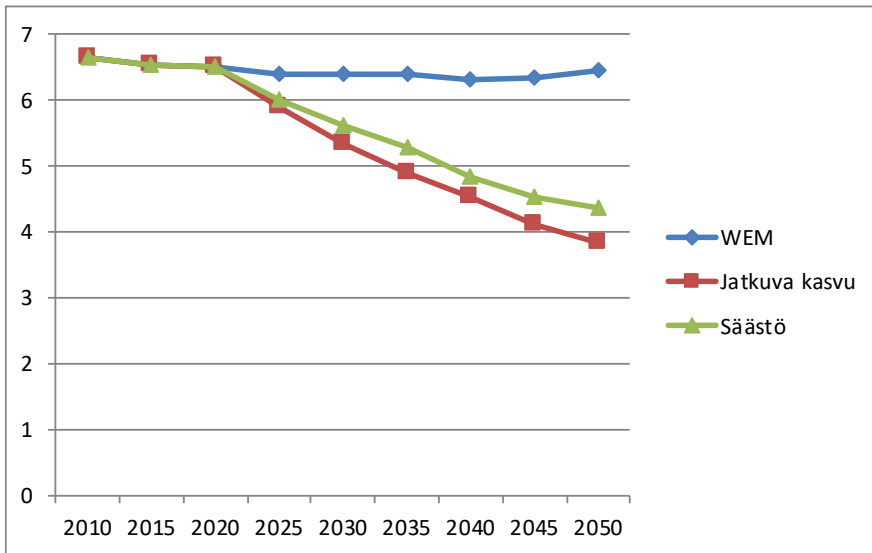
Liisa Maanavilja (Luke)

Skenaarioissa maataloussektorin päästöjä vähentävät eläinmäärien väheneminen, peltoalan tarpeen väheneminen, turvemaapeltojen viljelyn muutokset sekä keino-lannoitteiden käytön väheneminen. Pellon, etenkin turvemaapellon, siirtyminen muihin maankäyttömuotoihin ja turvemaapeltojen viljelyn muutokset vähentävät päästöjä myös LULUCF-sektorin viljelysmailla ja ruohikkoalueilla (ks. luku 6.1).

Maataloussektorin osalta WEM-skenaariossa vuoden 2050 päästöt ovat 0,07 Mt CO₂ ekv., 1 %, alhaisemmalla tasolla kuin vuonna 2015 (Taulukko 11, Kuva 15) eläinmäärien vähenemisen vuoksi.

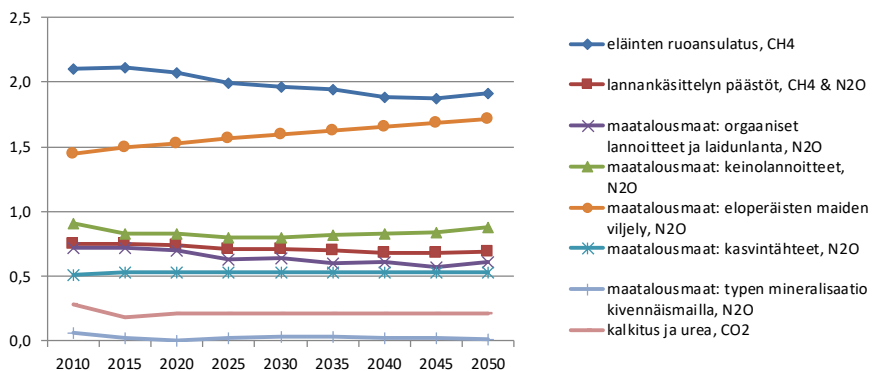
Taulukko 11. Maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöt (Mt CO₂-ekv.) eri skenaarioissa. Maatalouden muutokset vähentävät päästöjä myös LULUCF-sektorilla (kts. luku 6.1).

	WEM	Jatkuva kasvu	Säästö
2010	6,65	6,65	6,65
2015	6,52	6,52	6,52
2020	6,49	6,50	6,50
2025	6,39	5,90	5,99
2030	6,39	5,33	5,62
2035	6,38	4,88	5,27
2040	6,31	4,51	4,84
2045	6,34	4,10	4,53
2050	6,45	3,84	4,36
Muutos 2015–2050	-0,07	-2,68	-2,16
Muutos, %	-1	-41	-33
Muutos 2015–2035	-0,14	-1,64	-1,25
Muutos, %	-2	-25	-19



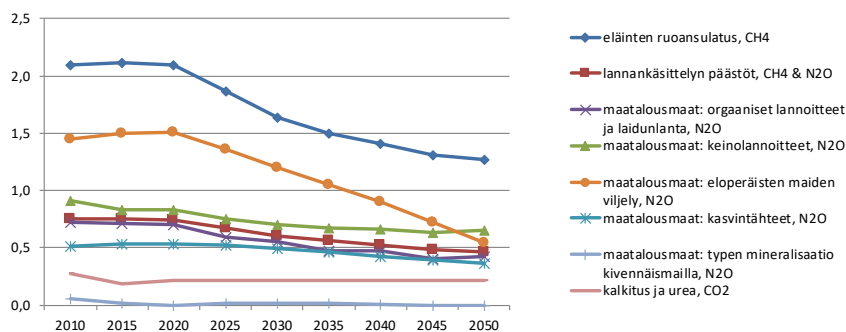
Kuva 15. Maatalussektorin kasvihuonekaasupäästöjen kehitys eri skenaarioissa (Mt CO₂-ekv.). Maatalouden muutokset vähentävät päästöjä myös LULUCF-sektorilla (kts. luku 6.1).

Eläinmäärien väheneminen WEM-skenaariossa vähentää eläinten ruoansulatuksen metaanipäästöjä 0,20 Mt CO₂ ekv., lannankäsittelyn metaani- ja dityppioksidipäästöjä 0,06 Mt CO₂ ekv. ja maatalousmaiden orgaanisten lannoitteiden ja laiduntamisen dityppioksidipäästöjä 0,11 Mt CO₂ ekv (kuva 16). Turvemaan peltojen määrä kuitenkin jatkaa kasvuaan, mikä lisää maatalousmaiden dityppioksidipäästöjä 0,22 Mt CO₂ ekv.



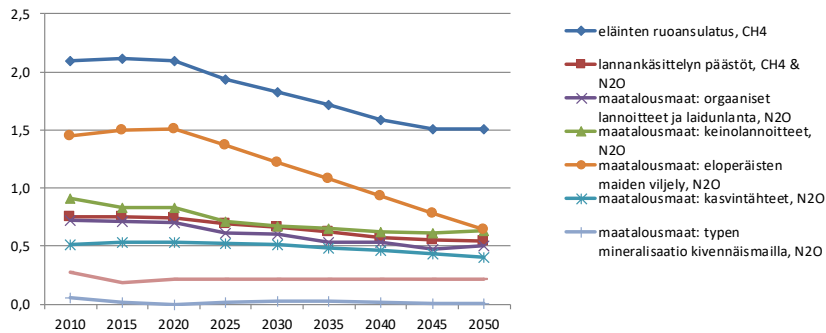
Kuva 16. Maatalussektorin kasvihuonekaasupäästöt päästölähteittäin WEM-skenaariossa (Mt CO₂-ekv.).

Jatkuva kasvu -skenaariossa vuoden 2050 päästöt ovat 2,68 Mt CO₂ ekv., eli 41 % alhaisemmalla tasolla kuin vuonna 2015 (Taulukko 11, Kuva 15). Ruokavaliomuutoksen aikaansaama eläinmäärien väheneminen vähentää eläinten ruoansulatuksen metaanipäästöjä 0,85 CO₂ ekv., lannankäsittelyn metaani- ja dityppioksidipäästöjä 0,29 Mt CO₂ ekv. ja maatalousmaiden orgaanisten lannoitteiden ja laiduntamisen dityppioksidipäästöjä myös 0,29 Mt CO₂ ekv (Kuva 17). Keinolannoitteiden käytön väheneminen vähentää maatalousmaiden dityppioksidipäästöjä 0,18 Mt CO₂ ekv. Turvemaan peltojen poistuminen viljelykäytöstä yhdessä turvemaiden säätösaloajituksen, kosteikkoviljelyn ja energiakasvikäytön kanssa vähentää maatalousmaiden dityppioksidipäästöjä 0,96 Mt CO₂ ekv (Kuva 17).



Kuva 17. Maataloussektorin kasviuonekaasupäästöt päästölähteittäin Jatkuva kasvu -skenaariossa (Mt CO₂-ekv.).

Säästö-skenaariossa vuoden 2050 päästöt ovat 2,16 Mt CO₂ ekv., eli 33 % alhaisemmalla tasolla kuin vuonna 2015 (Taulukko 11, Kuva 15). Ruokavaliomuutoksen aikaansaama eläinmäärien väheneminen vähentää eläinten ruoansulatuksen metaanipäästöjä 0,61 CO₂ ekv., lannankäsittelyn metaani- ja dityppioksidipäästöjä 0,21 Mt CO₂ ekv. ja maatalousmaiden orgaanisten lannoitteiden ja laiduntamisen dityppioksidipäästöjä 0,22 Mt CO₂ ekv (Kuva 18). Keinolannoitteiden käytön väheneminen vähentää maatalousmaiden dityppioksidipäästöjä 0,20 Mt CO₂ ekv. Turvemaan peltojen poistuminen viljelykäytöstä yhdessä turvemaiden säätösaloajituksen, kosteikkoviljelyn ja energiakasvikäytön kanssa vähentää maatalousmaiden dityppioksidipäästöjä 0,85 Mt CO₂ ekv (Kuva 18).



Kuva 18. Maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöt päästölhteittäin Säästö-skenaariossa (Mt CO₂-ekv.).

Jos maataloudessa toteutuu voimakkaaseen kotieläintuotannon vähenemiseen perustuva KHK-päästöjen vähennys, se vaikuttaa myös maaseudun rahavirtoihin monella tapaa. Maataloustuotannon kokonaisarvo pienenee, samoin kuin maataloustulo. Lisäksi viljelijöiden määrä vähenee vähintäänkin samassa suhteessa kuin maataloustuotannon kokonaisarvo. Tällä on luonnollisesti vaikutuksia maaseudun elinvoimaisuuteen erityisesti niillä ydinmaaseudun alueilla, joissa maataloudella nykyisin on suuri taloudellinen merkitys.

Koska Säästö- ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa kuvattu maataloustuotannon muutos on seurausta kulutuksen muutoksista ja tapahtuu suhteellisen pitkän ajan kuluessa, oletuksena on ollut, että maatalouden tuki mukautuu maatalouden tuotannossa tapahtuvaan muutokseen. Käytännössä tämä tarkoittaa kaiken muun maataloustuen paitsi ympäristöperusteisen tuen vähenemistä tai ennallaan pysymistä. Ympäristöperusteinen tuki lisääntyy määrällisesti ja suhteellisesti Jatkuva kasvu -skenaariossa ja suhteellisesti Säästö-skenaariossa. Vaikka skenaarioissa ei ole asiaa varsinaisesti mallinnettu, niin johdonmukaista maatalouden ilmastopolitiikkaa olisi kohdistaa ympäristöperusteinen tuki enenevässä määrin maatalouden sellaisiin ilmastotoimiin, jotka vähentävät KHK-päästöjä ja lisäävät hiilensidontaa. Tämä epäilemättä jonkin verran vielä voimistaisi Jatkuva kasvu - ja Säästö-skenaarioiden kuvaamaa KHK-päästöjen vähenemistä.

Vaikka tässä yhteydessä ei ole pystytty tekemään tarkempaa analyysiä siitä, miten maataloustuotannon vähenemisen taloudelliset vaikutukset kohdistuisivat alueellisesti, niin tasapainoisen alueellisen kehityksen näkökulmasta maaseutu- ja aluepoliittisia tukitoimenpiteitä pitäisi luonnollisesti suunnata sinne, missä maatalouden kokonaisarvon vähenemisen vaikutukset uhkaisivat kaikkein eniten alueiden elinvoimaisuutta. Jatkossa tarvitaankin yhä pidemmälle vietyä maatalous-, maaseutu- ja aluepolitiikkojen yhteensovittamista, jotta ilmastopolitiikan hyvinvointivaikutukset saataisiin kohdistettua riittävän tasapuolisesti ja oikeudenmukaisesti.

6. Vaikutusarviot LULUCF-sektorin kasvihuonekaasupäästöihin ja -poistumiin

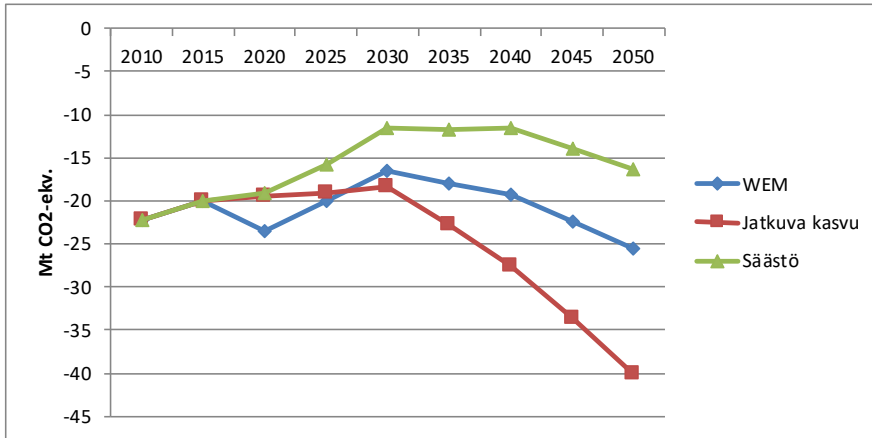
6.1 Kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat eri skenaarioissa

Tarja Tuomainen (Luke)

Laaditut kolme skenaariota WEM, Jatkuva kasvu ja Säästö tuottivat toisistaan poikkeavat kehityspotit LULUCF-sektorille, mutta kaikissa skenaarioissa sektori pysyy nettonieluna eli kasvihuonekaasujen poistumat ovat päästöjä suuremmat. Jatkuva kasvu -skenaariossa päädytään vuoteen 2050 mennessä WEM-skenaarioon nähden 15 Mt CO₂-ekv. suurempaan nettonieluun, kun taas Säästö-skenaariossa päädytään 10 Mt CO₂-ekv. pienempään nettonieluun kuin WEM-skenaariossa (Kuva 19). Skenaariot hakevat kehityssuuntaansa vuoteen 2030, jonka jälkeen niiden erot vahvistuvat. Jatkuva kasvu - ja Säästö-skenaarioissa haettiin päästövähennyksiä etenkin kohdistamalla toimenpiteitä maatalousmaille. Toimenpiteillä tarkoitetaan tässä lähinnä sitä, millaisia maapohjia (kivennäismaa, turvemaa) skenaarioissa pidetään viljelyssä, ja kuinka paljon maatalousmaata voitaisiin laskelmissa kohdistaa muuhun käyttöön. Maatalouden pinta-alaa rajoittamalla saadaan viljelysmaa-luokan päästöjä vähennettyä, mutta samalla nämä kohteet siirtyvät muihin luokkiin, ja pysyvät siten edelleen LULUCF-sektorin laskennassa.

Metsittämistä pidettiin näissä skenaarioissa ensisijaisena vaihtoehtona vapautuvalle maatalousmaalle. Vaikka metsityspinta-alat olivat merkittäviä, niiden vaikutus nielua kasvattavana ei juuri näy, koska käytetty aikajänne on suhteellisen lyhyt, ja metsityspinta-alan määrä suhteessa jo olemassa olevan metsämaan alaan on pieni.

Laadituissa skenaarioissa nähdään metsien nielussa tapahtuvien muutosten vaikutus sektorin taseeseen. Kun hakkuissa korjattavaa puutavaran määrää lisätään, nielu pienenee (Säästö), ja päinvastoin, kun korjattavan puun (biomassan) määrää vähennetään, nielu kasvaa (Jatkuva kasvu). Puutuotteet eivät täysin kompensoi alenevaa nielua, vaikka tuotanto painottuisi pitkäikäisiin tuotteisiin (Säästö).

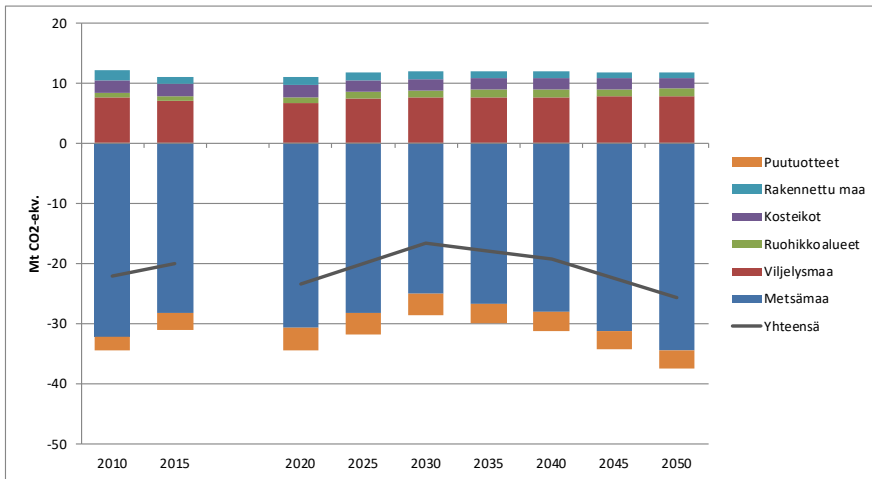


Kuva 19. LULUCF-sektorin nettohiilinielun kehitys eri skenaarioissa.

WEM-skenaariossa ei oleteta merkittäviä muutoksia maankäyttösektorilla tapahtuviin toimiin. Metsien nielun kehittyminen dominoi koko sektorin hiilitasetta, vaikka metsien nielu pienenee alle nykyisen tason vuoteen 2030 mennessä hakkuukertymän noustessa 10-vuotijaksolla 2025–2034 80 miljoonaan m³:iin vuodessa ja kokonaispoistuman 91 miljoonaan m³:iin vuodessa (Kuva 13; Liite C, Taulukko 2). Tämän jälkeen metsien nielu alkaa jälleen kasvaa, ja sektorin nielu vuonna 2050 on 26 Mt CO₂-ekv. (Kuva 20; Liite E, Taulukko 1). Turpeen energiakäytön vähetessä kosteikkojen päästöt hieman alenevat, mutta tämä päästövähennys peittyy maatalousmaiden päästöihin. Maatalousmaan pinta-alan oletettiin pysyvän nykyisellä tasolla ja pellonraivauksen ja maatalousmaan siirtymisen muuhun käyttöön jatkuvan saman suuruisena kuin on tapahtunut keskimäärin vuosina 2005–2015. Näiden seurauksena myös päästöt jopa hieman nousevat, kun turvemaiden osuus viljelysmaasta kasvaa.

Vaikka metsityksestä ja metsäkadosta aiheutuvat päästöt ja poistumat sinällään sisältyvät edellä esitettyihin maankäyttöluokkien taseisiin, voidaan niitä tarkastella erillisinä toimenpiteinä. On kuitenkin muistettava, että ne esitetään tässä raportissa summattuna alalle, jossa toimenpide on tapahtunut joko kyseisenä vuonna tai sitä edeltävinä 19 vuotena.

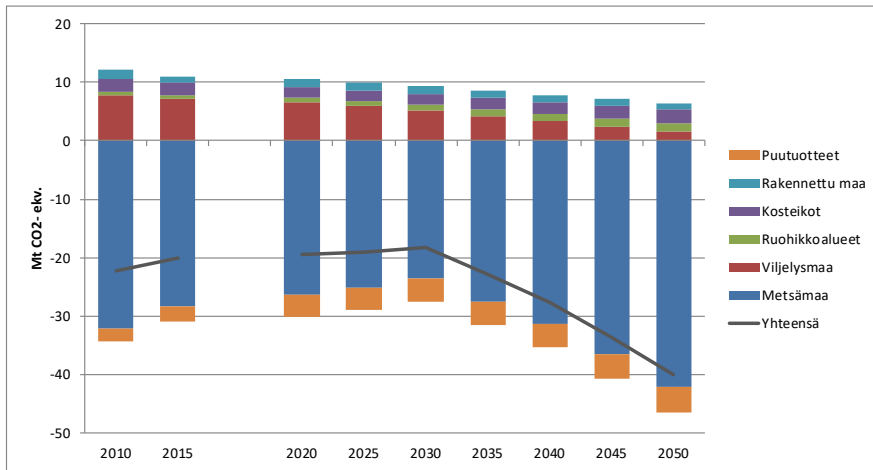
WEM-skenaariossa metsityksellä aikaansaattava nielu ei kasva merkittävästi nykytasosta. Vuonna 2050 metsitysalueiden päästöjen ja poistumien tase on 0,2 Mt CO₂-ekv. Sen sijaan metsäkadon päästöt alenevat noin 3 Mt CO₂-ekv.:sta alle 2 Mt CO₂-ekv.:iin. Syynä ovat uuden turvetuotantoalan ja viljelysmaan tarpeen vähentyminen.



Kuva 20. LULUCF-sektorin historialliset päästöt ja poistumat vuosille 2010 ja 2015 (Tilastokeskus 2019) sekä niiden kehittyminen WEM-skenaariossa vuoteen 2050.

Jatkuva kasvu -skenaariossa sektorin nielu pysyy nykyisellä tasolla, mutta on samalla alhaisempi ensimmäisen vuosikymmenen aikana kuin WEM-skenaariossa. Vuoden 2030 jälkeen nielu nopeasti kääntyy kasvuun, ollen 2050 jo 40 Mt CO₂-ekv. (Kuva 21; Liite E, Taulukko 2). Nielun kannalta suotuisa kehitys seuraa WEM-skenaariota alhaisemmasta hakkuiden tasosta. Hakkuukertymä on suurimmillaan, 81 miljoonaa m³ vuodessa, jaksolla 2025–2034, jonka jälkeen kertymä alenee tasaisesti vuoteen 2050 (Kuva 13; Liite C, Taulukko 3). Hakkuut ovatkin tässä skenaariossa alhaisemmat kuin WEM- ja Säästö-skenaarioissa. Tämän seurauksena puustovaranto pääsee kehittymään niin, että runkokuun kokonaistilavuus ylittää vuonna 2050 3,2 mrd. m³. Päästöjen vähenemää saadaan maatalousmailta, kun maatalouden käytössä oleva ala vähenee, ja etenkin turvemaita siirtyy pois viljelystä ja metsitetään. Vuonna 2035 viljelysmaan päästöt ovat puolittuneet nykyisestä ja puolittuvat edelleen vuoteen 2050 mennessä ollen 1,6 Mt CO₂-ekv. WEM-skenaarioon verrattuna puutuotteiden nielu ei pienene vaikka hakkuut vähenevät, koska puuraaka-aine ohjautuu pitkäkestoisiin tuotteisiin (Liite E, Taulukko 2).

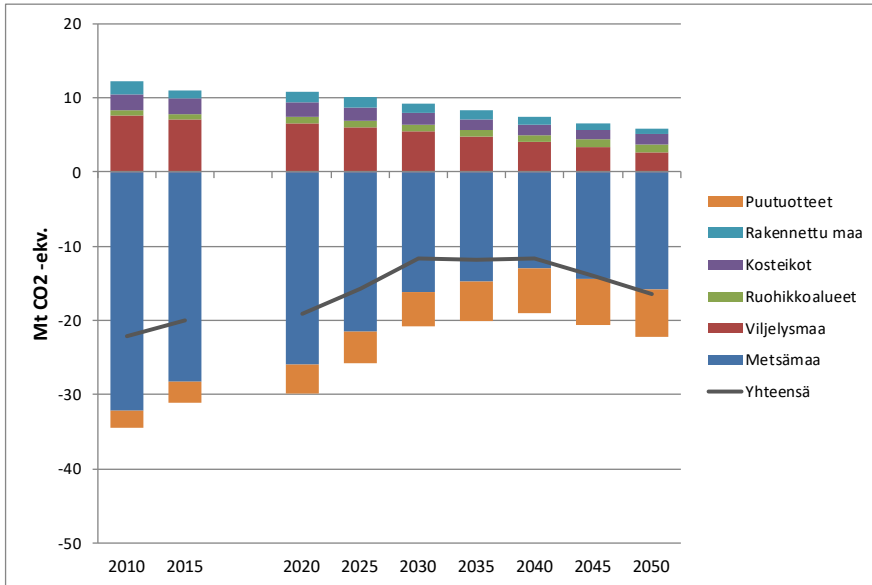
Jatkuva kasvu -skenaariossa metsityksellä ei enää saada aikaan nielua, vaan metsitysalueet muuttuvat netto-nielusta nettopäästökseksi. Vuonna 2035 ollaan nollatilanteessa, ja vuonna 2050 päästö on 0,4 Mt CO₂-ekv. Tilanne on seurausta sekä käytöstä poistuvien turvetuotantoalueiden ja turvemaapeltojen metsityksestä. Turpeen hajoamisen päästö jatkuu metsityksen jälkeen, jota puuston sitoma hiili ei kata 20 vuoden tarkastelujakson aikana. Sen sijaan metsäkadon päästöt alenevat merkittävästi, kun metsänraivauksen tarve muihin maankäyttömuotoihin vähenee. Vuonna 2035 päästöt ovat 1,8 Mt CO₂-ekv. ja vähenevät edelleen vuoteen 2050 mennessä 1,4 Mt CO₂-ekv.:iin. Tällöin päästöt aiheutuvat pääasiassa metsämaalle tapahtuvasta rakentamisesta.



Kuva 21. LULUCF-sektorin historialliset päästöt ja poistumat vuosille 2010 ja 2015 (Tilastokeskus 2019) sekä niiden kehittyminen Jatkuva kasvu -skenaariossa vuoteen 2050.

Säästö-skenaario tuotti LULUCF-sektorille pienimmän nielun niin, että vuodesta 2030 alkaen vuoteen 2040 nettonielu on alle 12 Mt CO₂-ekv. (Kuva 22; Liite E, Taulukko 3). Vuoteen 2050 mennessä nielu hieman kasvaa, mutta jää selvästi alle 20 Mt CO₂-ekv:n. Säästö-skenaariossa metsien käyttö on intensiivistä ja 90 miljoonan m³ vuotuinen hakkuukertymätaso ylitetään vuoden 2035 jälkeen (Kuva 13; Liite C, Taulukko 3). Metsien nielun kannalta keskeisen kokonaispoistuman tilavuus ylittää 100 miljoonaa m³ vuodessa, kun WEM- ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa vuotuinen kokonaispoistuma pysyy koko skenaarion laskentajakson ajan selvästi alle 100 milj. m³:ssa. Maatalousmaiden päästöt alenevat myös Säästö-skenaariossa, mutta eivät yhtä paljon kuin Jatkuva kasvu -skenaariossa. Puutuotteisiin sitoutuu hiiltä merkittävästi ja puutuotteiden nielu ylittää 6 Mt CO₂ vuoteen 2050 mennessä (Liite E, Taulukko 3). Vaikka Jatkuva kasvu -skenaariossa oli jo mukana 'uusia puutuotteita', ovat niiden tuotantomäärät Säästö-skenaariossa huomattavasti suuremmat.

Metsityksestä aiheutuu Säästö-skenaariossa Jatkuva kasvu -skenaariota suurempi päästö, 0,8 Mt CO₂-ekv. Säästö-skenaariossa metsityksen kohteista suurin osa oli turvemaita, kun taas Jatkuva kasvu -skenaariossa metsitettiin myös kivennäismaita, joilla sekä puuston että maaperän nielun kehittyminen on nopeampaa. Näissä kahdessa skenaariossa kehityskulku poikkesi täysin WEM-skenaariosta, mutta ne olivat myös keskenään erilaiset. Säästö-skenaariossa metsitys kehittyi nopeasti päästölähteeksi, ollen 1,0 Mt CO₂-ekv. vuonna 2040, jonka jälkeen päästö kääntyy laskuun. Metsäkadon osalta Säästö-skenaariossa ei poikkea merkittävästi Jatkuva kasvu -skenaariosta, mutta päästö on kuitenkin hieman alhaisempi 2050, 1,2 Mt CO₂-ekv.



Kuva 22. LULUCF-sektorin historialliset päästöt ja poistumat vuosille 2010 ja 2015 (Tilastokeskus 2019) sekä niiden kehittyminen Säästö-skenaariossa vuoteen 2050.

6.2 Metsän hiilinielujen muutokset ja laskentatapojen vaikutukset: vertailua eri skenaariotöiden välillä

Jyrki Aakkula, Hannu Hirvelä, Harri Kilpeläinen, Paula Ollila ja Tarja Tuomainen (Luke)

Metsien hiilinielujen laskentaan liittyy lukuisia epävarmuuksia. Riippuen käytetyistä malleista ja niiden lähtöoletuksista sekä laskentaperiaatteista voidaan etenkin pitkällä aikavälillä päätyä toisistaan suuresti poikkeaviin tuloksiin, sillä metsän kasvun dynaaminen luonne, eli korkoa korolle -efekti, tuottaa suhteellisen pienistäkin lähtötilanteen oletusten eroista yli ajan laskettaessa merkittäviä eroja lopputilanteessa.

Taulukossa 12 esitetään MALULU- (Aakkula et al. 2019) ja MALUSEPO-hankkeiden metsien WEM-skenaarioiden hiilinielut (taulukon 12 laskentatavat A ja B). Vaikka skenaario on molemmissa tapauksissa sama metsäteollisuuden raaka-ainekäytön ja sitä vastaavan hakkuumäärän osalta, ero metsien hiilinielussa kasvaa WEM (varastonmuutos) -skenaarioissa varsin huomattavaksi vuoteen 2050 mennessä: -59,0 Mt CO₂-ekv. (MALULU-WEM (varastonmuutos)) ja -34,4 Mt CO₂-ekv. (MALUSEPO-WEM (varastonmuutos)). Näiden kahden skenaarion välinen ero johtuu useista tekijöistä, joista tärkein on skenaariossa käytetty erilainen metsien alkuvaiheen kehityksen simulointi. MALULU-hankkeen skenaarioissa simulointia ohjattiin laskennallisesti niin, että aineiston ajantasaistamisessa (vuodet 2011–2014) puuston kokonaiskasvu ja -poistuma saatiin vastaamaan mahdollisimman hyvän

VMI:n mittaustulosta ja tilastoja. MALUSEPO-laskelmissa käytettiin uudempaa inventointiaineistoa (VMI11/12-aineisto vuosilta 2013–2017) ilman aineiston ajantasaistamista. MALULU:ssa aineiston laskennallinen päivitys perustui suuralueiden puuston kasvun ja poistuman tilastotietoihin, mistä johtuen MELA-laskennassa metsikkötasolla tehtyyn aineiston päivitykseen liittyy epävarmuustekijöitä mm. hakkuiden kohdentamisessa. MALUSEPO-laskennassa käytettiin myös uutta, paremmin todellisuutta vastaavaa hakkuutähdemallia (ks. tarkemmin Liite D).

Hiilinielulaskelmien monimutkaisuutta lisää vielä se, että hiilivarastojen muutoksia lasketaan yleisesti kahdella eri tavalla, joko varastonmuutosmenetelmällä tai kasvun ja poistuman erotuksena (IPCC 2006, McRoberts et al. 2018). Varastonmuutosmenetelmässä puuston hiilivaraston muutos lasketaan kahden ajankohdan varastojen erotuksena, kun taas kasvu-poistuma -menetelmässä muutos nimensä mukaisesti lasketaan biomassan kasvun ja poistuman erotuksesta. Suomen KHK-inventaariossa käytetään kasvu-poistuma -menetelmää, jossa tilavuuskasvu ja poistuma muunnetaan biomassoiksi ja edelleen hiileksi muuntokertoimilla. Kasvan puuston rakenne on erilainen kuin hakkuissa poistettavan puuston rakenne; esimerkiksi oksien ja juurten suhde runkopuun määrään voi olla erilainen. Skenaarioissa puuston rakenne muuttuu ajassa metsänhoitotoimenpiteiden johdosta, ja tämä vaihtelu tulee ottaa huomioon käytetyissä kertoimissa.

MALUSEPO-hankkeessa metsien hiilinielut on laskettu käyttäen varastonmuutosmenetelmää kuten myös MALULU-hankkeessa. Suomi on soveltanut kasvu-poistuma -menetelmää EU:n LULUCF-asetuksen mukaisessa metsien vertailutason laskennassa. Taulukossa 12 on vertailun vuoksi annettu arviot metsän hiilinieluista WEM-skenaariolle myös metsien vertailutasolaskennassa käytetyillä KHK-inventaarion muuntokertoimilla laskettuna (laskentatapa D). Vertailutasolaskentaan kuten ei myöskään skenaarioihin ole mahdollista laskea kertoimia samalla tavalla kuin khk-inventaariossa lasketaan. Vertailutasolaskennan kertoimet tullaan päivittämään teknisenä korjauksena. Kertoimet eivät kuitenkaan sellaisenaan sovellu pitkän ajanjakson skenaarioiden laskentaan, koska metsien rakenne skenaarioissa voi olla erilainen kuin nykymetsissä.

Taulukko 12. Metsän hiilinielut eri WEM-skenaarioissa ja eri hiilinielun laskentatavoilla, Mt CO₂-ekv.

Skenaario ja laskentatapa	2020	2030	2035	2040	2050
A. MALULU-WEM (varastonmuutos)	-38,45	-38,24	ei saatavilla	-48,08	-59,03
B. MALUSEPO-WEM (varastonmuutos)	-30,64	-25,00	-26,66	-28,01	-34,43
C. MALUSEPO-WEM (kasvu-poistuma aineistosta lasketuilla kertoimilla)	-30,64	-25,00	-26,66	-28,01	-34,43
D. MALUSEPO-WEM (kasvu-poistuma KHK-inventaarion kertoimilla)	-19,47	-13,78	-15,40	-16,73	-24,09

Ilmastopoliittisen haasteen suuruutta korostaa se, että epävarmuus ei liity pelkääntään puuston ja maaperän mallinnukseen vaan myös metsäbiomassaan sitoutuvan hiilen määrän arviointiin. Maaperän hiilivaraston muutoksen ja KHK-päästöjen mallinnus on tunnetusti haasteellista ja tulosten epävarmuudet suuria.

Esitetystä vertailusta (Taulukko 12) näkyy, että mallinnetussa laskennassa, kuten MALUSEPO-skenaarioissa, kasvu–poistuma- ja varastonmuutoslaskentatavat (B ja C) tuottavat käytännössä saman tuloksen, mikäli biomassan muuntokertoimet lasketaan skenaarioiden simuloituista aineistoista. Taulukosta 12 (laskentatavat C ja D) nähdään lisäksi kuinka suuren eron biomassan muuntokertoimet tuottavat metsien hiilinielulle, kun kaikki muut tekijät MALUSEPO-WEM-skenaariossa pysyvät samoina.

Laskentatapojen B ja C vertailun tulos osoittaa, että varastonmuutoslaskentatapa on käyttökelpoinen skenaariolaskennassa. Mitatuista aineistoista kuten VMI-aineistosta tuloksia laskettaessa menetelmien välillä voidaan joskus havaita eroja (McRoberts et al. 2018).

MELA-mallin tulosten hajonta ei johdu pelkääntään mallin tai sen sisältämien funktioiden herkkyydestä aineiston ja oletusten muutoksille, vaan myös puunkäytön skenaarioiden edellyttämistä hakkuista. Mitä lähempänä puun käytössä liikutaan puun tuotantoon perustuvan metsätalouden suurinta, jatkuvasti hakattavissa olevaa hakkuukertymää, sitä haastavampaa on löytää vaihtelevien puunkäyttöskenaarioiden mukaisia ratkaisuja. Siksi metsä- ja teollisuuspolitiikassa olisi hyvä kiinnittää nykyistä enemmän huomiota puunkäytön ja metsien rakenteen yhteensovittamiseen (Hyvönen et al. 2019).

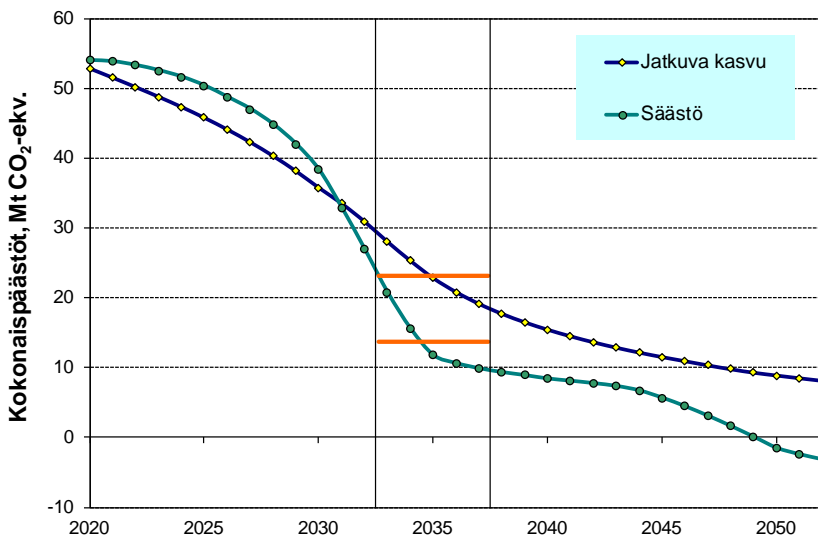
Metsien hiilinielujen arviointiin liittyy sitä enemmän epävarmuustekijöitä, mitä pitemmälle tulevaisuuteen mallittamista tehdään. Ilmastopoliittisesta näkökulmasta tarkasteltuna kyseessä on tietysti haaste, koska hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi keskeisen metsien hiilinielun kehityksen ennustaminen on epävarmaa.

7. Vaikutusarviot energiatalouteen ja kasvihuonekaasupäästöihin

Antti Lehtilä (VTT)

7.1 Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys

Tarkastelussa käytetty energiajärjestelmämalli kattaa kaikki Kioton pöytäkirjan käsittelemät neljä tärkeintä kasvihuonekaasulajia, eli hiilidioksidin (CO₂), metaanin (CH₄), typpioksiduulin (N₂O) ja niin sanotut F-kaasut (fluorihiihivedyt (HFC), perfluorihiihivety (PFC) ja rikkiheksafluoridi (SF₆)). Kahdessa aiemmasta Pitko-hankkeesta jatkotarkasteluun valitussa vähäpäästöskenaariossa Suomelle on asetettu kansallinen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen vähimmäistavoite, joka on 87,5–90 % vuoden 1990 kokonaispäästöistä (ks. luku 2). Vuoden 2050 tavoitteen lisäksi jatkotyössä asetettiin konkreettinen tavoite hiilineutraaliudesta, jolla tarkoitettiin sitä, että kun vuosittaisista päästöistä vähennetään maankäytön ja maankäytön muutosten (LULUCF) tuottama hiilidioksidin vuotuinen nettonielu, kaikkien päästöjen nettomääräksi saadaan nolla. Hiilineutraalius tulisi tavoitteen mukaan saavuttaa jo vuonna 2035, ja sen jälkeen päästöjen kokonaistaseen tulisi kääntyä pysyvästi negatiiviseksi.

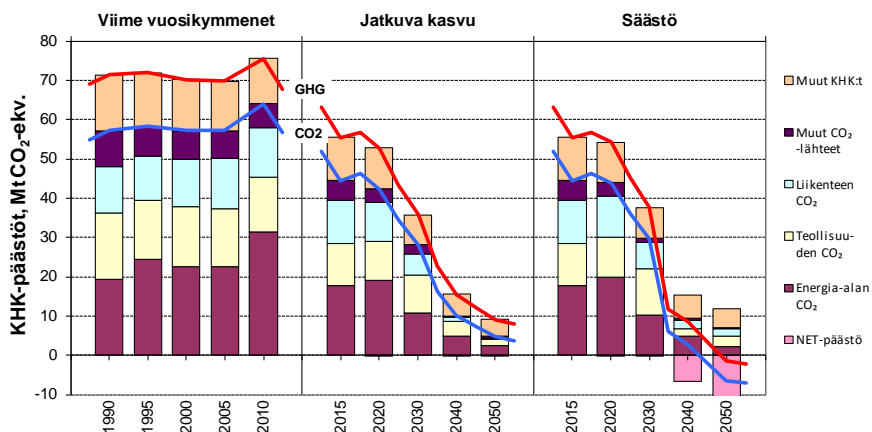


Kuva 23. Päästöjen hiilinetoneutraaliustavoitteen asettaminen vuodelle 2035 ja päästöjen laskennallinen kehitys vuoteen 2050. Punaiset viivat tarkoittavat laskennallisen viiden vuoden periodin tavoitteeksi asetettua keskiarvopäästötasoa.

Laskentaa varten tarvittiin siten lähtötiedoksi arviot LULUCF-päästöluokan nettonielun kehityksestä, ja erityisesti arviot nielun suuruudesta vuonna 2035 kummassakin skenaariossa. Nieluarviot laati Luonnonvarakeskus omilla metsätaloutta, maankäyttöä ja puutuotteiden hiilivarastoja kuvaavilla pitkän aikavälin laskentamalleillaan (ks. luku 6). Koska energiajärjestelmämallinnuksessa laskentaperiodit ovat yleensä 5 vuoden mittaisia, vuoden 2035 periodia koskeva päästötavoite asetettiin periodin päästöjen keskiarvolle, mitä on havainnollistettu kuvassa 23.

Kuvassa 24 on esitetty Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys päälähteittäin perusurassa (WEM) ja vähäpäästöskenaarioissa (ilman LULUCF-päästöjä). WEM-skenaariossa ovat mukana vain nykyiset politiikkatoimet vuoteen 2020, mutta vähäpäästöskenaarioissa ovat mukana suunnitellut kotimaiset lisätoimet, EU:n energia- ja ilmastopolitiikan tavoitteet vuodelle 2030 sekä oletettu EU:n tavoite vähintään 85 %:n kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksestä vuoteen 2050 mennessä. Koko EU:n päästötavoitteen on siis myös oletettu hieman kirstyvän aiemasta 80 %:sta.

Tulosten mukaan päästöjen kokonaismäärä on vuonna 2020 WEM-skenaariossa vajaat 55 Mt, eli 23 % vähemmän kuin vertailuvuonna 1990. Vähäpäästöskenaarioiden päästöurat alkavat erkaantua WEM-skenaariosta selvästi jo 2020-luvulla, siten että Jatkuvan kasvun skenaariossa kokonaispäästöjen vähennys on vuonna 2030 noin 50 % ja Säästö-skenaariossa noin 47 % vuoden 1990 tasosta. Suomi ylittää siten kummassakin ripeään hiilineutraalisuuteen tähtäävissä vertailupolussa EU:n yhteisen vuotta 2030 koskevan tavoitteen, eli 40 %:n päästönvähennyksen. Koska perusurassa (WEM) on käytetty EU:n komission referenssiskenaariota oletuksia päästöoikeuksien hintojen kehityksestä (ks. kuva 25, EC 2016), päästöt vähenevät myös WEM-skenaariossa vuoden 2030 jälkeen verrattain tasaisesti noin 27 miljoonan tonnin tasolle vuoteen 2050 mennessä, mikä vastaa jo varsin tuntuva, 63 %:n vähennystä.



Kuva 24. Kasvihuonekaasujen päästöjen kehitys skenaarioittain.

Jatkuvan kasvun skenaariossa vuodelle 2050 asetettu 87,5 %:n päästöjen vähentämisen vähimmäistavoite saavutetaan kotimaisin toimin ilman hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS), skenaarion lähtöoletusten mukaisesti. Säästö-skenaariossa tavoitteet sekä hiilineutraalisuudesta vuonna 2035 että 90 %:n päästönvähennyksestä vuonna 2050 saavutetaan sen sijaan huomattavalta osin bio-CCS:n tuottamien huomattavien negatiivisten päästöjen tuella. Vuonna 2050 CCS:n tuoma päästövähennys on kaikkiaan noin 14 Mt. Bruttopäästöissä (ilman negatiivista päästökompensaatiota) saavutettu vähennys on Säästö-skenaariossa siten noin 82 % vuonna 2050.

Hahmotelluista vähäpäästöpoluista Jatkuva kasvu- ja Säästö edustavat siten hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin osalta aiempien Pitko-skenaariotarinoiden ääripäitä. Jatkuvan kasvun skenaariossa CCS:n oletetaan jäävän joko teknis-taloudellisesti tai hyväksyttävyyteen liittyvien esteiden takia toteuttamiskelvottomaksi Suomessa, kun taas Säästö-skenaariossa oletetaan CCS:n ja erityisesti myös bio-CCS:n (bioenergian konversioon sovellettu CCS) olevan käytettävissä, mutta talteen otettu hiilidioksidi joudutaan kuljettamaan esimerkiksi Pohjanmerellä tai Baltiassa sijaitseviin loppusijoituskohteisiin.

Kuvasta 24 voidaan myös havaita, miten CCS:n puuttuminen keinovalikoimasta johtaa Jatkuvan kasvun skenaariossa erittäin tiukkoihin päästönvähennystoimiin kaikilla sektoreilla, mukaan lukien maatalous ja teollisuusprosessit, joissa päästöjen voimakas vähentäminen on teknis-taloudellisten arvioiden mukaan vaikeinta. Skenaariossa polttoaineiden polton päästöjä kyetään tulosten mukaan kustannustehokkaasti vähentämään noin 95 % ja teollisuusprosessien päästöjä 79 % vuoteen 2010 verrattuna, mutta myös maatalouden päästöjä joudutaan vähentämään reippaasti vuoteen 2050 mennessä, lähes 50 %, jotta asetettu 87,5 % päästövähennystavoite saavutetaan. Teollisuudessa mineraaliteollisuuden raaka-aineperäisten prosessipäästöjen tuntuva vähentäminen jää Jatkuvan kasvun skenaariossa pulmalliseksi, sillä terästeollisuuden siirtyessä vetypelkistykseen masuunikuonaa ei enää ole saatavissa sementin seosmateriaaliksi kalkkikivestä poltetun klinkkerin korvaajaksi, eikä CCS ole myöskään käytettävissä.

Säästö-skenaariossa CCS-tekniikan käyttö bioenergiaan puolestaan johtaa negatiivisiin polttoaineiden polton päästöihin vuonna 2050, jolloin erityisesti maatalouden päästöihin voidaan kohdistaa lievempiä toimia. Maataloudessa vähennys jää tällöin 39 %:iin, mikä mahdollistaa skenaariotarinan mukaisen ruoka-omavaraisuuden säilymisen hyvänä ilman suuria muutoksia ruokavaliassa. Säästö-skenaariossa CCS:n kaupallistuminen ja soveltaminen Suomessa johtavat päästöjen vähentämiseen yli 90 %:n vähimmäistavoitteen aina 100 %:iin saakka, kun oletettu päästökauppa tekee negatiivisten päästöjen tuottamisen kannattavaksi.

Kasviuonekaasujen inventaareissa, joilla päästötaseita raportoidaan muun muassa YK:n ilmastusopimuksen sihteeristölle ja EU:n komissiolle, päästöt raportoidaan seuraavilta päästöluokilta (tai -sektoreilta):

- 1 (A) polttoaineiden energiakäytön päästöt ja (B) polttoaineiden tuotantoon, jakeluun ja kulutukseen liittyvät haihtuma- ja karkauspäästöt
- 2 teollisuusprosesseista vapautuvat, raaka-ainekäytöistä aiheutuvat päästöt, sekä F-kaasujen ja dityppioksidin käytöstä aiheutuvat päästöt

- 3 maatalous: kotieläinten ruoansulatuksen CH₄-päästöt, lannankäsittelyn CH₄- ja N₂O-päästöt, maaperän N₂O-päästöt, kasvintähteiden pellolla polton N₂O-päästöt sekä kalkituksen ja urealannoituksen CO₂-päästöt
- 4 LULUCF: CO₂-päästöt ja -poistumat eri maankäyttöluokista; lisäksi mm. puutuotteiden, maastopalojen ja metsäkulutuksen päästöt sekä pellonraivaamisen, metsämaiden ja turvetuotantoalueiden N₂O- ja CH₄-päästöt
- 5 jäte: kaatopaikat, kompostointi ja jätevesien käsittely
- lisäksi raportoidaan epäsuorat CO₂-päästöt NMVOC- ja CH₄-päästöistä.

Taulukoissa 13 ja 14 on esitetty järjestelmämallinnuksen tuloksista kootut kasvihuonekaasupäästöjen taseet vuosille 2030 ja 2050 käyttäen päästöjen inventaarioissa noudatettua jaottelua, mutta ilman LULUCF-luokkaa. On huomattava, että erityisesti luokkien 1A1 ja 1A2 välinen raja-alue on laskentamallissa jonkin verran inventaariosta poikkeava, joten päästöjen kohdentumista näiden keskeisten päästöluokkien kesken on pidettävä vain suuntaa-antavana.

Taulukko 13. Kasvihuonekaasupäästöjen tase WEM-skenaariossa (pl. LULUCF).

Gg(CO ₂ -ekv.) Päästöluokka	2010	2015	2020	2030	2035	2040	2050
1A Polttoaineiden polton päästöt	60095	40715	39992	33802	31428	26062	15244
1A1 Energiateollisuus	30947	17766	16875	12899	12352	9422	5757
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10250	6949	8522	8204	8054	7996	3838
1A3 Kotimaan liikenne	12712	11109	11090	9832	8542	6447	3900
1A4 Muut sektorit	4982	3803	2413	1821	1460	1207	822
1A5 Muu polttoainekäyttö	1204	1088	1092	1047	1019	989	927
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	142	146	141	129	123	120	118
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6147	5861	6350	6161	4849	4647	4412
2A Mineraaliteollisuus	1167	964	1171	1183	1029	1044	1125
2B Kemianteollisuus	1016	1170	1340	1375	387	351	221
2C Metalliteollisuus	2439	2142	2446	2724	2740	2737	2608
2D Muu kuin energiakäyttö	85	104	95	100	102	104	107
2F F-kaasut	1438	1480	1298	778	591	410	351
3 Maatalous	6630	6491	6571	6548	6491	6455	6342
3A Kotieläinten ruoansulatus	2099	2117	2078	2046	2008	1970	1864
3B Lannankäsittely	748	751	819	788	743	719	662
3D Maatalousmaat	3502	3439	3448	3486	3513	3539	3589
3F Kasvintähteiden poltto pellolla	2	3	3	3	3	3	3
3G Kalkitus	277	180	222	222	222	222	222
3H Urean levitys	2	2	2	2	2	2	2
5 Jätteiden käsittely	2583	2134	1644	1041	793	629	452
5A Jätteiden kaatopaikkasijoitus	2194	1766	1268	699	455	295	126
5B Jätteiden biologinen käsittely	144	113	100	100	100	100	100
5D Jätevesien puhdistus	246	254	276	242	238	235	225
Epäsuorat CO ₂ päästöt	68	53	76	76	76	76	76
Päästöt yhteensä pl. LULUCF-sektori	75664	55400	54774	47757	43759	37989	26644

Huom. Maatalouden päästötulokset eivät täysin vastaa Luken vastaavia (vrt. luku 5) tuloksia

Taulukko 14. Kasvihuonekaasupäästöjen tase Jatkuva kasvu -skenaariossa (pl. LULUCF).

Gg(CO₂-ekv.) Päästöluokka	2010	2015	2020	2030	2035	2040	2050
1A Polttoaineiden polton päästöt	60095	40715	38292	23595	14307	7473	3340
1A1 Energiateollisuus	30947	17766	17098	9137	5875	4267	2524
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10250	6949	7569	6356	4170	1589	32
1A3 Kotimaan liikenne	12712	11109	10091	5668	2498	1069	351
1A4 Muut sektorit	4982	3803	2442	1387	745	332	265
1A5 Muu polttoainekäyttö	1204	1088	1092	1047	1019	215	168
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	142	146	136	123	82	73	53
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6147	5861	6328	5797	3410	3223	1664
2A Mineraaliteollisuus	1167	964	1090	1113	1187	1257	1263
2B Kemiateollisuus	1016	1170	1340	1375	387	351	220
2C Metalliteollisuus	2439	2142	2412	2596	1304	1350	0
2D Muu kuin energiakäyttö	85	104	95	100	101	103	107
2F F-kaasut	1438	1480	1391	612	430	161	75
3 Maatalous	6630	6491	6358	5158	4629	4132	3436
3A Kotieläinten ruoansulatus	2099	2117	1989	1537	1375	1256	1105
3B Lannankäsittely	748	751	764	629	568	467	378
3D Maatalousmaat	3502	3439	3395	2826	2529	2261	1816
3F Kasvintähteiden poltto pellolla	2	3	3	3	3	3	3
3G Kalkitus	277	180	207	162	153	143	132
3H Urean levitys	2	2	2	2	2	2	2
5 Jätteiden käsittely	2583	2134	1643	1004	711	540	346
5A Jätteiden kaatopaikkasijoitus	2194	1766	1266	662	462	304	133
5B Jätteiden biologinen käsittely	144	113	100	100	100	100	100
5D Jätevesien puhdistus	246	254	276	242	149	137	113
Epäsuorat CO ₂ päästöt	68	53	62	62	62	62	62
Päästöt yhteensä pl. LULUCF-sektori	75664	55400	52819	35738	23200	15503	8900

Huom. Maatalouden päästötulokset eivät täysin vastaa Luken vastaavia (vrt luku 5) tuloksia.

Taulukko 15. Kasvihuonekaasupäästötase Säästö-skenaariossa (pl. LULUCF).

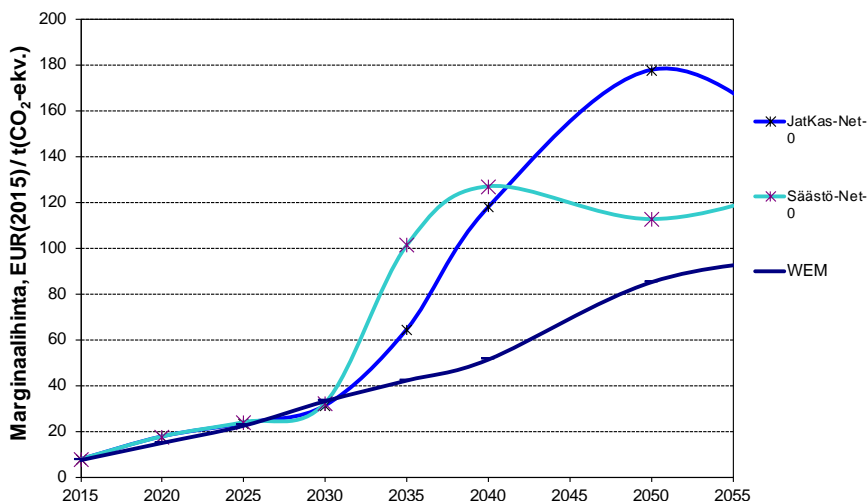
Gg(CO ₂ -ekv.) Päästöluokka	2010	2015	2020	2030	2035	2040	2050
1A Polttoaineiden polton päästöt	60095	40715	39623	25423	4416	-6	-7834
1A1 Energiateollisuus	30947	17766	17572	8501	-1371	-3120	-11467
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10250	6949	7887	8739	2080	349	1436
1A3 Kotimaan liikenne	12712	11109	10660	6959	3053	2242	1777
1A4 Muut sektorit	4982	3803	2412	612	403	301	252
1A5 Muu polttoainekäyttö	1204	1088	1092	612	250	222	168
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	142	146	139	145	90	84	67
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6147	5861	6438	5655	3546	3379	1796
2A Mineraaliteollisuus	1167	964	1095	926	772	772	848
2B Kemianteollisuus	1016	1170	1350	1375	1124	1082	758
2C Metalliteollisuus	2439	2142	2506	2642	1239	1261	0
2D Muu kuin energiakäyttö	85	104	95	100	101	103	107
2F F-kaasut	1438	1480	1391	612	310	161	83
3 Maatalous	6630	6491	6316	5299	4877	4441	4043
3A Kotieläinten ruoansulatus	2099	2117	1979	1654	1526	1399	1295
3B Lannankäsittely	748	751	735	609	616	495	532
3D Maatalousmaat	3502	3439	3395	2856	2559	2375	2052
3F Kasvintähteiden poltto pellolla	2	3	3	3	3	3	3
3G Kalkitus	277	180	202	175	171	167	160
3H Urean levitys	2	2	2	2	2	2	2
5 Jätteiden käsittely	2583	2134	1646	1023	710	539	348
5A Jätteiden kaatopaikkasijoitus	2194	1766	1270	681	461	303	135
5B Jätteiden biologinen käsittely	144	113	100	100	100	100	100
5D Jätevesien puhdistus	246	254	276	242	149	137	113
Epäsuorat CO ₂ päästöt	68	53	62	62	62	62	62
Päästöt yhteensä pl. LULUCF-sektori	75664	55400	54223	37606	13700	8500	-1518

Huom. Maatalouden päästötulokset eivät täysin vastaa Luken vastaavia tuloksia.

Negatiivisia päästöjä voidaan saada aikaan paitsi LULUCF-sektorilla (maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous), myös ottamalla talteen hiilidioksidia joko ilmakehästä tai uusiutuvasta biomassasta ja varastoimalla se pysyvästi esimerkiksi geologisiin muodostelmiin. Tässä työssä on energiajärjestelmämallinnuksen yhteydessä käsitelty negatiivisina päästöinä ainoastaan CCS:n soveltamista uusiutuvan bioenergian konversiossa (BECCS), joka täyttää negatiivisten päästöjen kansainvälisesti hyväksytyin määritelmän. CCS:n soveltaminen fossiilisten polttoaineiden tai materiaalien konversiossa ei tuota sinänsä negatiivisia päästöjä, mutta voi kaupallisuudessaan laajentaa energiantuotannon ja teollisuuden päästönvähennysten keinovalikoimaa. Hiilidioksidin talteenotto ilmakehästä (DAC I. Direct Air Capture) on kehittyvä teknologia, jonka on yleensä arvioitu tulevan kustannustehokkaaksi vasta yli 200 €/t nousevilla päästöjen hintatasoilla (vertaa kuva 25), ja siksi sitä ei otettu

tarkastelussa huomioon. Tulevaisuudessa DAC-tekniikalla saattaa kuitenkin olla suuri merkitys hiilineutraalien polttoaineiden tuotannossa, mutta mahdollisesti vasta vuosisadan jälkipuoliskolla ja ensisijaisesti alueilla, joilla aurinkoenergian hyödyntäminen ja on edullisinta. Eri teknologioiden kehitykseen ja kilpailukykyyn liittyy pitkällä aikavälillä kuitenkin merkittävää epävarmuutta ja uuden teknologian kehityksessä voi syntyä myös radikaaleja teknologiahyppäyksiä.

Päästöjen vähentämisen rajahinta heijastaa varsin hyvin tarvittavien toimien vaikeutta ja suoraa kustannusvaikutusta (kuva 25). Tulosten mukaan hiilineutraalustavoitteen saavuttaminen nostaisi rajahintaa selvästi oletetun EU:n päästökaupahintojen kehitystä korkeammalle tasolle: noin 65 €/t Jatkuvan kasvun skenaariossa ja noin 100 €/t Säästö-skenaariossa. Vuoden 2040 jälkeen, kun päästötavoitteet edelleen kiristyvät, rajahinta nousee CCS-tekniikan poissulkemisen takia Jatkuvan kasvun skenaariossa kuitenkin selvästi Säästö-skenaariota suuremmaksi.



Kuva 25. Päästöjen vähentämisen marginaalikustannukset. WEM-skenaario vastaa EU:n referenssiskenaariota (EU 2016) päästökaupan hintakehitystä.

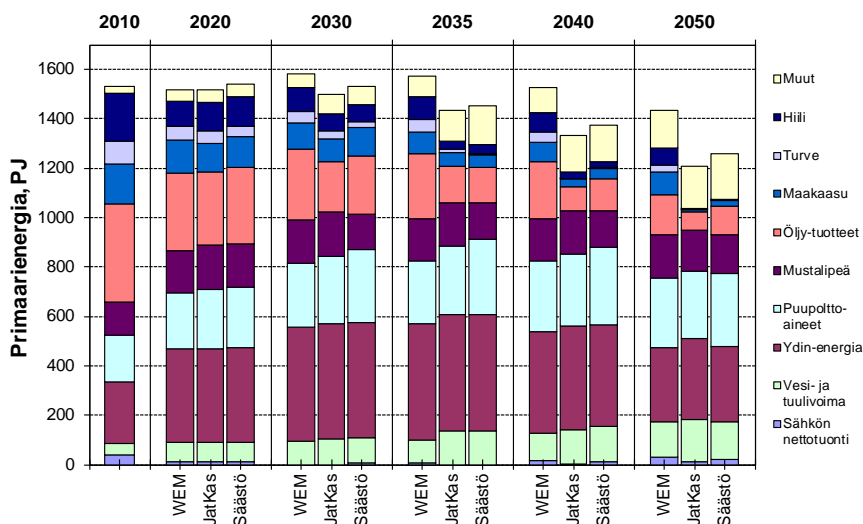
7.2 Energianhankinta

7.2.1 Primaarienergian kokonaiskulutus

Energian kokonaiskulutus eli primaarienergian hankinta ja sen jakautuminen eri energialähteisiin on kasvihuonekaasupäästöjen kannalta keskeinen kehitystekijä, sillä polttoaineperäiset päästöt ovat nykyisin noin 75 % kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä (LULUCF-sektori pois lukien). TIMES-VTT-mallin tuottama primaarienergian kokonaiskulutuksen kehitys on esitetty kuvassa 26. Energian kokonaiskulutus on mallinnettu ja raportoitu yhdenmukaisesti IEA:n energiataseiden kanssa,

joten luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia kansallisen energiatilastoinnin kanssa. Primaarienergian kokonaiskulutus on WEM-skenaariossa korkeimmillaan noin 1570 PJ (436 TWh) vuosina 2030–2035, jonka jälkeen kulutus alkaa pienentyä. Vähäpäästöskenaarioissa mukana olevilla lisätoimilla ei aiemman PITKO-hankkeen skenaariotuloksissa ollut suurta vaikutusta vuoden 2030 kulutuksen kokonaismäärään, mutta uudet skenaariolaskelmat osoittavat, että vuoden 2035 tiukka hiilineutraalisuustavoite vaikuttaa selvästi jo vuoden 2030 energiankulutukseen, mutta toki erityisesti vuosina 2035–2040.

Fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee kaikissa skenaarioissa merkittävästi jo vuoteen 2030 mennessä, sillä jo WEM-skenaariossa oletetut päästöoikeuksien nousuvat hinnat ja uusiutuvan energiatekniikan kehitys heikentävät fossiilisten polttoaineiden kilpailukykyä. Vähäpäästöskenaarioissa erityisesti mineraaliöljyn ja kivihiiilen kokonaiskulutus vähenevät WEM-skenaariota voimakkaammin jo vuoteen 2030 mennessä, mutta maakaasu säilyttää tällöin vielä asemansa verrattain hyvin olemassa olevan infrastruktuurin ja tuotantokapasiteetin ansiosta. Vuosina 2020–2030 käyttöön tulevat yksi tai kaksi uutta ydinvoimalaitosta vaikuttavat lauhdevoimalaitoksina kumpikin tuntuvasti primaarienergiataseen rakenteeseen ja määrään, ja samoin vaikuttavat Loviisan ja Olkiluodon vanhojen laitosten käyttöiän pidennykset.

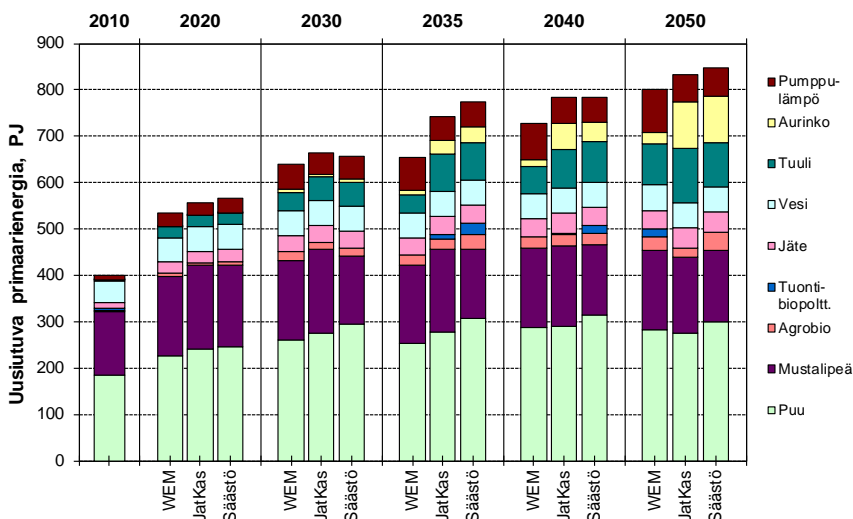


Kuva 26. Primaarienergian kokonaishankinnan kehitys skenaarioittain.

Uusiutuvan energian kokonaismäärä nousee vuoteen 2030 mennessä 50–64 % vuoden 2010 tasosta, kuten voidaan nähdä kuvasta 27. Vuoteen 2050 mennessä vastaava lisäys on 100–110 %. Lisäys on luonnollisesti suurinta vähäpäästöskenaarioissa, mutta energiatehokkuuden paranemisen takia absoluuttiset erot WEM-skenaarioon eivät ole kovin suuria. Tuuli- ja aurinkoenergia nousevat kaikissa vähäpäästöskenaarioissa merkittävään asemaan uusiutuvan energian hankinnassa.

Vuonna 2017 niiden osuus oli vasta 3,6 %. WEM-skenaariossakin osuus nousee yli nelinkertaiseksi, 14 %:iin. Tuulivoiman osalta kannattaa kuitenkin huomata, että viime vuosina sen kilpailukyvyyn kehitys on ollut poikkeuksellisen nopeaa, ja kehityksen nopeutta lähivuosikymmeninä on hyvin vaikeaa arvioida, minkä vuoksi myös tuloksiin sisältyy epävarmuutta.

Kuvassa 27 ”puu” tarkoittaa kaikkea puuperäistä primaarienergiaa metsäteollisuuden sivutuoteliemiä ja kierrätyspuuta lukuun ottamatta. Vuoteen 2030 mennessä yhteenlaskettu puun energiakäyttö (puu ja mustalipeä) kasvaa tuntuvasti erityisesti Säästö-skenaarioissa, mikä johtuu osaltaan metsäteollisuuden tuotantomääristä, jotka tuovat kasvua sivutuotteiden määrään, ja toisaalta metsähakkeen käytön lisäyksestä. Kun puun energiakäyttö oli vuonna 2016 yhteensä noin 360 PJ (100 TWh), se nousee vuonna 2030 eri skenaarioissa 430–450 PJ:n määrään (120–126 TWh). Vuoden 2030 jälkeen skenaariotarinoiden välisistä eroista huolimatta puun energiakäyttö pysyy suunnilleen samalla tasolla ja on 440–450 PJ vuonna 2050 (123–126 TWh). Säästö-skenaarioissa puun energiakäyttöä rajoittaa metsäteollisuuden kasvava sellutuotanto, jonka ainespuun käyttö rajoittaa energiapuun saatavuutta ja nostaa sen hintaa, vaikka toisaalta kehittyneiden biopoltonesteiden kysyntä aiheuttaa puun energiakäytön lisäyspainetta. Mustalipeän energiakäyttöä vähentää Säästö-skenaariossa ligniinin ja hemiselluloosan hyödyntäminen energian sijasta uusiin biotaloustuotteisiin. Myös maatalouden sivutuotteiden käyttö nousee vähäpäästöskenaarioiden tuloksissa näkyväksi sekä biokaasun tuotannossa että oljen energiakäyttönä. Yhdyskuntajätteen energiakäyttö pysyy kaikissa skenaarioissa vuoteen 2030 saakka nykytasolla, noin 20 PJ:n (n. 6 TWh), ja alkaa sen jälkeen lievästi laskea tehostuneen kierrätyksen tuloksena.

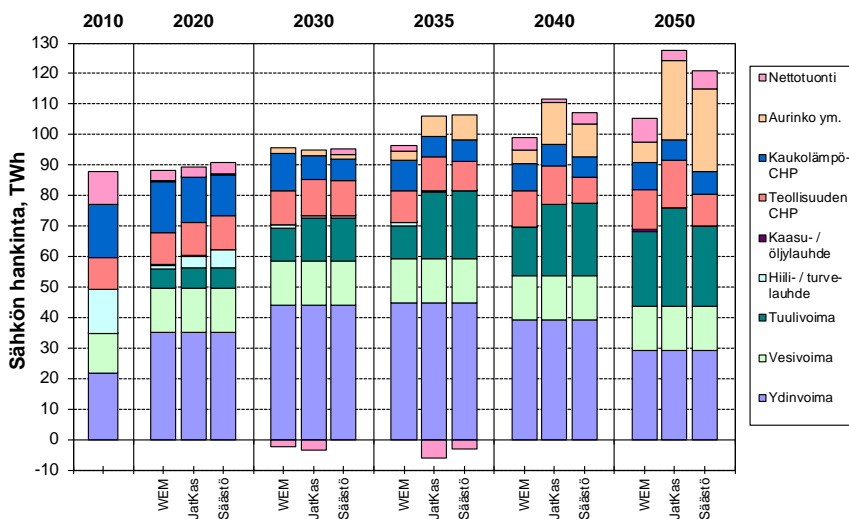


Kuva 27. Uusiutuvan primaarienergian kulutus skenaarioittain.

7.2.2 Sähköenergian hankinta

Energiateollisuus, erityisesti sähkön ja lämmön tuotanto, on maailmanlaajuisesti tärkein hiilidioksidia polttoaineiden poltosta tuottava sektori, ja Suomessa sen osuus polttoaineiden polton hiilidioksidipäästöistä on ollut lisäksi kansainvälistä keskiarvoa suurempi, joten sähkön ja lämmön tuotannon kehityksellä on keskeinen merkitys kaikissa vähäpäästöpoluissa. Mallilaskelmien mukainen sähkön kokonaishankinnan kehitys on esitetty energialähteittäin kuvassa 28.

Tulosten mukaan sähkön kokonaiskulutus nousee vuonna 2030 WEM-skenaariossa 93 TWh:iin ja vähäpäästöskenaarioissa vain hieman alemmaksi, 91–92 TWh:iin. Sähkön kulutus ja tuotanto ovat vuonna 2030 lähes tasapainossa kahden uuden ydinvoimalaitoksen ja nopeasti kasvavan tuulivoiman tuotannon ansiosta. Säästö-skenaariossa tuontitarve on vuonna 2030 vajaat 2 TWh, mutta muissa skenaarioissa se kääntyy pieneksi nettovienniksi. Hiilineutraaliustavoitteen vaikutukset sähkötaseeseen alkavat näkyä selvemmin vuoden 2030 jälkeen, jolloin sähköistyminen voimistuu kaikilla sektoreilla ja sähköä aletaan käyttää laajemmassa mitassa myös ns. sähköpolttoaineiden jalostukseen (power-to-X-teknologia). Vuonna 2050 sähkön kokonaiskulutus on tulosten mukaan 105–127 TWh, jossa on kasvua 11–39 % vuodesta 2030. Suurimmaksi sähkön kulutus nousee Jatkuvan kasvun skenaariossa, jossa talouskasvu pysyy hyvänä ja sähköllä korvataan laajemmin polttoaineiden käyttöä, kun hiilidioksidin talteenotto ja varastointi eivät tule käyttöön. Säästö-skenaariossa, jossa CCS on käytettävissä, energiapöytäjärjestelmän muutokset ovat sen ansiosta muilta osin maltillisempia. Sähkön tuontitarve on vuonna 2050 tulosten mukaan eri skenaarioissa 3–8 TWh, eli siltä osin sähkön huoltovarmuus pysyy kohtuullisen hyvänä verrattuna esimerkiksi nykytilanteeseen.



Kuva 28. Sähkön hankinta energialähteittäin eri skenaarioissa.

Aurinkovoiman kustannukset ovat pudonneet erittäin voimakkaasti viimeisen kymmenen vuoden aikana, ja kustannuskehityksen oletettiin jatkuvan suotuisana, ja erityisesti juuri vähäpäästöskenaarioissa. Mallilaskelmien tuloksissa oletukset johtavat aurinkovoiman läpimurtoon Suomenkin olosuhteissa vuoden 2030 jälkeen niin, että vuonna 2050 tuotanto on kummassakin vähäpäästöskenaariossa 25–27 TWh. Tuulivoiman tuotanto nousee vuonna 2020 lähes 7 TWh:n tasolle ja edelleen vuonna 2030 kummassakin vähäpäästöskenaarioissa yli kaksinkertaiseksi, runsaaseen 14 TWh:iin ja vuonna 2035 yli 20 TWh:iin. Vuodelle 2050 VTT:n tuulivoima-asiantuntijat ovat arvioineet realistiseksi teknis-taloudelliseksi potentiaaliksi 28 TWh, josta merituulivoimaa olisi noin 40 %. Näissä arvioissa on huomioitu myös tuulivoimainvestointeja rajoittavia tekijöitä, kuten puolustusvoimien asettamat rajoitteet tuulivoimainvestoinneille, joten myös korkeammat potentiaalit voivat olla tulevaisuudessa mahdolliset, mikäli investointien esteitä pystytään purkamaan. Mallilaskelmissa tuulivoiman tuotanto nousee vähäpäästöskenaarioissa 27–33 TWh:iin vuonna 2050. Kaikissa skenaarioissa Suomi olisi pitkällä aikavälillä sähkön nettotuotaja, mikä indikoi sitä, että esimerkiksi tuulivoimainvestoinnit olisivat hieman edullisemmat muissa Pohjoismaissa kuin Suomessa. Vuonna 2035 Suomi olisi tosin hetkellisesti sähkön nettoviejä, kun ydinvoimakapasiteetti on huipussaan.

Tuulivoima- ja aurinkovoimatuotannon vaihtelun vuoksi sähköjärjestelmään tarvitaan niiden roolin korostuessa merkittävä määrä joustokapasiteettia. Joustoa lisätään mallin tuloksissa investoinneilla varastointikapasiteettiin, kysyntäjoustoa ohjauviin älyverkkoihin ja sähkönsiirtoyhteyksiin. Vaihtelevaa tuotantoa hyödynnetään mallin tulosten mukaan runsaasti muun muassa ns. power-to-X sovelluksissa, joissa tuotettua vetyä tai hiilivetyä voidaan varastoida huomattavasti sähköä helpommin.

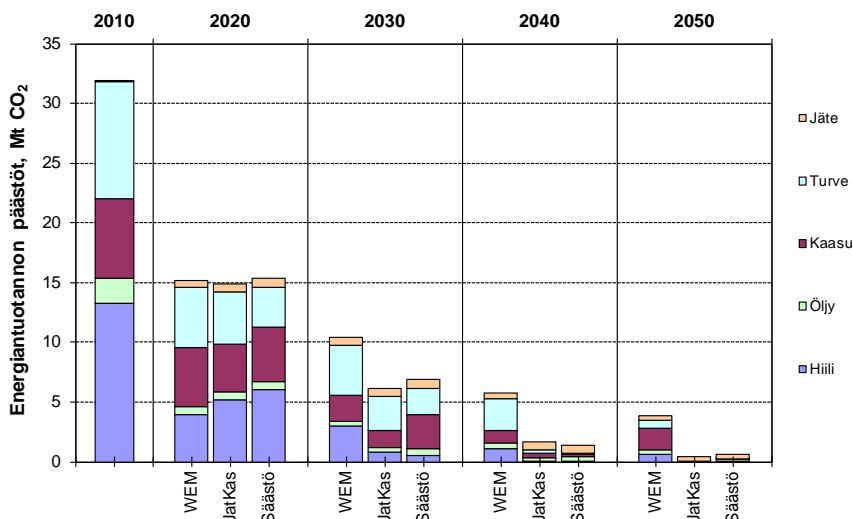
Yhdyskuntien yhdistetty sähkön tuotanto lämmöntuotannon yhteydessä (CHP) supistuu tulosten mukaan kummassakin vähäpäästöskenaarioissa 6–8 TWh:iin vuonna 2050. Jäljelle jäävät pääasiassa vain bioenergiapohjainen yhteistuotanto sekä ydin-CHP, joista jälkimmäisen oletettiin olevan modulaarisia pienreaktoreita ja käytettävissä vain Jatkuvan kasvun skenaariossa. Mikäli CCS on käytettävissä, suurimmissa kaukolämpöverkoissa olisi Säästö-skenaarion tulosten mukaan edullista investoida CCS:llä varustettuun happipoltto- tai CLC-tekniikkaan (Chemical Looping Combustion) perustuviin laitoksiin. Vaikka bioenergian hinnat nousevat tuntuvasti vähäpäästöskenaarioissa, kaukolämpöverkkojen olemassa olevan infrastruktuurin vuoksi kaukolämpöön liittyvä yhteistuotanto ei kuitenkaan dramaattisesti supistu. Kaukolämmön erillistuotannossa lämpöpumppujen käyttö laajenee huomattavasti, mikä lisää osaltaan energiasektorin omaa sähkön kulutusta. Teollisuuden CHP nousee Jatkuva kasvu -skenaarioissa yhdyskuntia merkittävämpään asemaan, sillä metsäteollisuuden integroidun yhteistuotannon potentiaali kasvaa jonkin verran sellun tuotannon osuuden kasvaessa ja paperin tuotannon lämmönkulutuksen alentuessa.

Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön kokonaismäärän kehitys voidaan myös nähdä kuvasta 28. Vesivoiman hyödyntämisen oletettiin kasvavan hitaasti, lähinnä vanhojen laitosten saneerauksen ja tehonkorotusten myötä, ja sen lisäys on saman suuruinen kaikissa skenaariossa. Uusiutuvan sähkön lisäyksestä suurin osa

saadaan tuuli- ja aurinkovoiman kasvusta, mutta myös biosähköllä on tuntuva rooli. Kaikkiaan uusiutuvan sähkön osuus nousee vähäpäästöskenaarioissa nykyisestä noin 45 %:sta 71–73 %:iin vuonna 2050. Ydinvoima mukaan lukien sähkön tuotanto on tällöin energiasektorilla 100 %:sesti hiilineutraalia tai hiilnegatiivista.

Energiantuotannon päästöillä tarkoitetaan sähkön, kaukolämmön ja teollisuuden prosessihöyryn tuotannon polttoaineiden poltossa syntyviä päästöjä. Energiantuotannon hiilidioksidipäästöjen kehitys on esitetty kuvassa 29 energialähteittäin (hiili, öljy, maakaasu, turve ja energiantuotantoon käytetyn jätepolttoaineen fossiilinen osuus). Energiantuotannon hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2015 runsaat 17 miljoonaa tonnia, mutta tulosten mukaan ne vähenevät jo WEM-skenaariossa noin 10 miljoonaan tonniin vuoteen 2030 mennessä, ja sen jälkeen päästöt vähenevät vuoteen 2050 mennessä alle 5 miljoonan tonniin. Vaikka päästöoikeuden hinnan on oletettu nousevan, turpeen nykyinen kevyempi verokohtelu säilyttää turpeen kilpailukyyn energiantuotannossa vuoteen 2030.

Vähähiiliskenaarioissa energiantuotannon päästöt vähenevät hiilineutraaliustavoitteen myötä vuoden 2030 jälkeen huomattavasti jyrkemmin siten, että vuonna 2040 päästöt painuvat kummassakin skenaariossa alle 2 miljoonan tonnin. Jatkuvassa kasvussa energiantuotannon päästöt asettuvat 1,6 miljoonaan tonniin ja Säästö-skenaariossa 1,4 miljoonaan tonniin. Säästö-skenaariossa oletetut energianverojen muutokset vaikuttavat erityisesti turpeen käyttöön. Jäljelle jäävistä päästöistä jätepolttoaineen osuus on 40–50 %, joten varsinaisten fossiilisten polttoaineiden ja turpeen päästöt ovat yhteensä alle miljoona tonnia, ja ne jakautuvat melko tasaisesti turpeen, maakaasun ja öljyn kesken. Vuonna 2050 muut kuin jätepolttoaineen päästöt ovat jo jokseenkin merkityksettömiä.



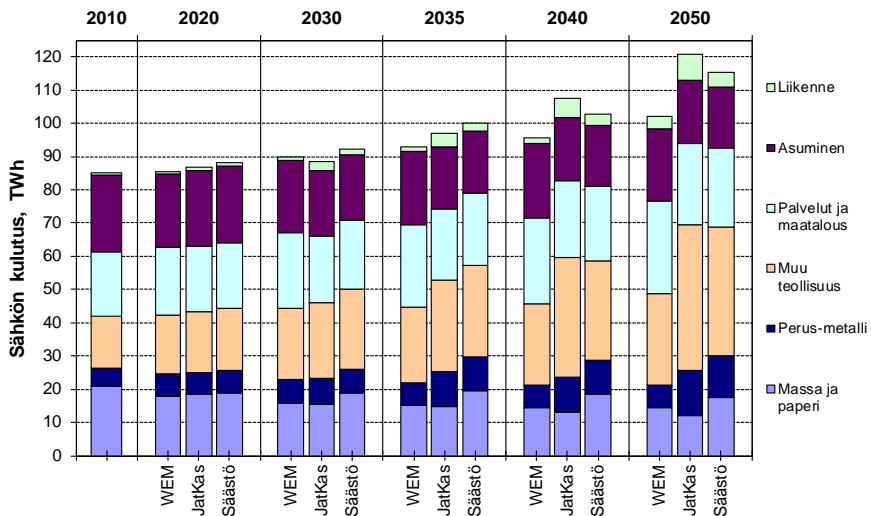
Kuva 29. Energiantuotannon hiilidioksidipäästöjen kehitys eri skenaarioissa.

7.2.3 Energian loppukulutus

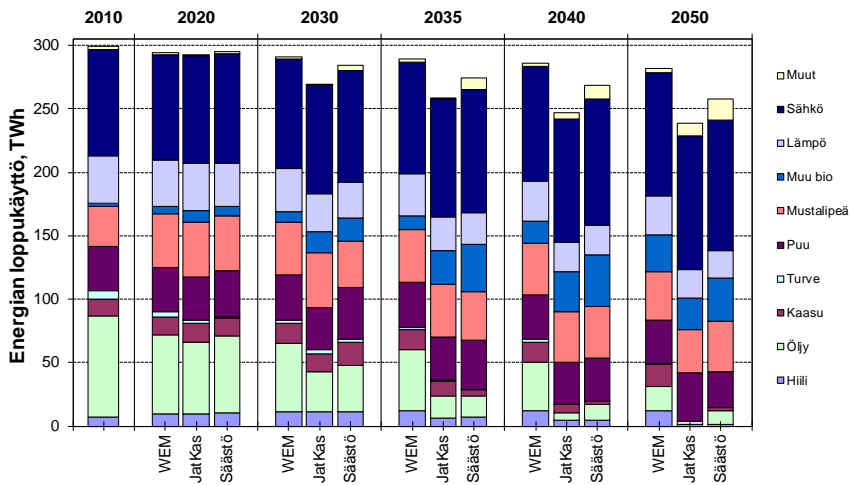
Vähäpäästöskenaariot aiheuttavat sähkön kulutuksen rakenteeseen varsin merkittäviä muutoksia. Sähköistyminen on keskeinen muutos kaikilla sektoreilla, mutta sen kulutusta kasvattava vaikutus kompensoituu huomattavilta osin energian käytön tehostumisella. Uutta sähkön kulutusta syntyy kuitenkin myös digitalisaation, energian varastoinnin ja hiilineutraalien sähköpolttoaineiden jalostuksen laajenemisen myötä. Mallilaskelmien mukainen sähkön kulutuksen kehitys on esitetty kuvassa 29. Tuloksissa on erityisesti huomattava liikenteen ja muun teollisuuden kulutuksen kasvu. Liikenteen sähkönkulutus nousee vuonna 2050 suurimmillaan 8 TWh:iin Jatkuvan kasvun skenaariossa, jossa suurin osa henkilöautoista on tuolloin täyssähköautoja. Säästö-skenaariossa, jossa liikenteen käyttövoimat painottuvat enemmän kehittyneisiin biopolttoaineisiin, kulutus jää 4 TWh:n tasolle.

Kuvassa 30 muu teollisuus sisältää energiateollisuuden, jonka kulutuksen kasvu on suurin sähkön kulutusmuutoksiin vaikuttava tekijä. Energiateollisuuden kulutuksen kasvu syntyy lähinnä energian varastoinnin ja konversion häviöistä, hiilineutraalien sähköpolttoaineiden tuotannosta sekä kaukolämpöpumppujen laajenevasta käytöstä yhdyskuntien kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuotantoon. Prosessiteollisuudessa sähkön kulutusta merkittävästi lisääviä muutoksia ovat suorapelkistyksen asteittainen käyttöönotto malmipohjaisenteräksen valmistuksessa, hybridisähköuunien käyttö mineraaliteollisuudessa sekä Jatkuvan kasvun skenaariossa myös elektrolyyttinen vedyn valmistus petrokemian teollisuudessa.

Muun muassa IEA:n noudattaman määritelmän mukainen energian loppukulutus oli Suomessa vuonna 2010 yhteensä noin 300 TWh, josta sähköä oli 28 %, lämpöä noin 13 % ja suoraa polttoainekäyttöä 59 % (IEA 2015, Tilastokeskus 2018). Tulosten mukaan loppukäytön kokonaismäärä pysyy WEM-skenaariossa vuoteen 2030 saakka lähellä vuoden 2015 tasoa (kuva 31). Syvien päästönvähennysten toteuttaminen edellyttää tulosten mukaan huomattavaa sähköistymistä kaikilla energian käyttösektoreilla, sillä fossiilisia polttoaineita ei voida korvata kestävästi bioenergialla riittävän laajassa mitassa.



Kuva 30. Sähkön kulutus sektoreittain eri skenaarioissa (huom. siirto- ja jakelujärjestelmän häviöitä ei ole luettu mukaan kulutukseen).



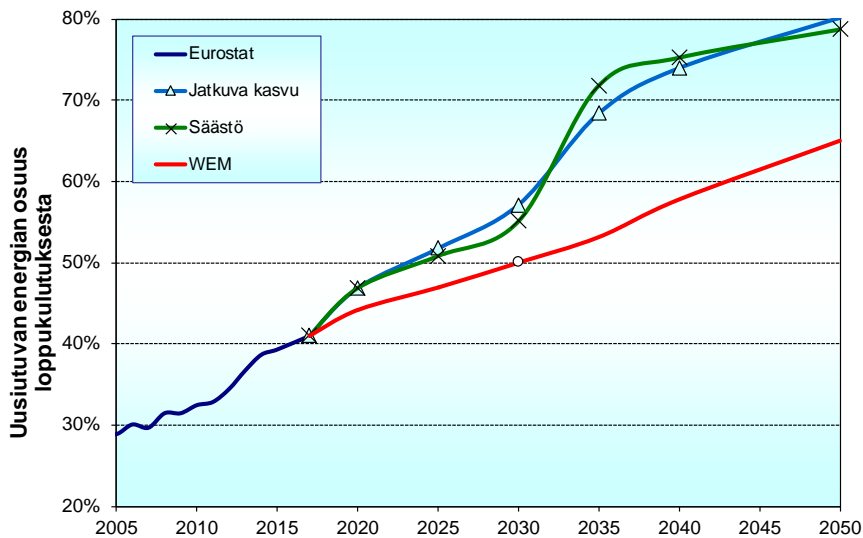
Kuva 31. Energian loppukulutus sektoreittain eri skenaarioissa.

Sekä energiatehokkuuden paranemisen että kilpailukykyisen hiilineutraalin kaukolämmön tuotannon rajallisuuden vuoksi kaukolämmön kulutus vähenee Jatkuva kasvu ja Säästö -skenaarioissa alle puoleen nykytasosta, mikä samalla vähentää yhdyskuntien yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon potentiaalia. Rakennusten lämmityksessä myös kaikki muu loppuenergian käyttö vähenee lämmityksen ominaiskulutusten putoamisen myötä, sekä uudisrakennuksissa että laajojen

energiakorjausten ansiosta, oletusten mukaan parhaimmillaan noin 60 % vuoden 2010 tasosta. Teollisuudessa keskeisiä vaikutuksia ovat kaikissa skenaarioissa sähköistyminen prosessilämmön tuotannossa ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biopolttoaineilla.

Uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta on puolestaan esitetty kuvassa 32. EU:n laskentasääntöjen mukaan laskettu energian loppukulutus nousee WEM-skenaariossa tasaisen hitaasti, mutta vähäpäästöskenaarioissa se nousee vuonna 2030 noin 55 %:iin ja vuonna 2050 lähes 80 %:iin. Osuuden kasvu ylittää siten vähäpäästöskenaarioissa hallituksen ohjelmassa esitetyn tavoitteen, jonka mukaan uusiutuvan energian osuuden tulee nousta 2020-luvulla yli 50 %:iin energian loppukulutuksesta. Vuoden 2030 jälkeen uusiutuvan osuus kasvaa hiilineutraalisuustavoitteen vuoksi erityisen nopeasti vuoteen 2035, mutta sen jälkeen osuuden kehitys tasaantuu vuoteen 2050 mennessä lähelle realistisesti saavutettavissa olevaa enimmäistasoa (ydinvoima ja jätteen energiakäyttö huomioon ottaen).

Uusiutuvista energialähteistä määrällisesti eniten kasvaa puuperäisen bioenergian käyttö, ja käytön lisäys kohdistuu voimakkaimmin metsähakkeeseen ja metsäteollisuuden jäteliemiin. Bioenergiaa aletaan tuottaa lisäksi nykyistä laajemmin maatalouden sivutuotteista, suurelta osin biokaasuna, mutta erityisesti Säästö-skenaariossa myös energiakasveista. Tuulivoiman tuotannon lisäys jatkuu vähäpäästöskenaarioissa voimakkaana vuoteen 2035 asti, jonka jälkeen aurinkoenergia nousee sen rinnalle uusiutuvan energian osuutta edelleen kasvattavana energialähteenä. Näiden lisäksi lämpöpumppujen ympäristöstä tuottama lämmitys- ja jäähdytysenergia tuovat merkittävän osan uusiutuvan energian lisäyksestä, kuten voitiin nähdä edellä kuvasta 27. Kaikkiaan uusiutuvan energian käytön voimakas lisääntyminen heijastuu lähes suoraan myös energiaomavaraisuuteen, jolloin omavaraisuus on joitakin prosenttiyksikköjä uusiutuvan osuutta korkeampi.



Kuva 32. Uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta skenaarioittain.

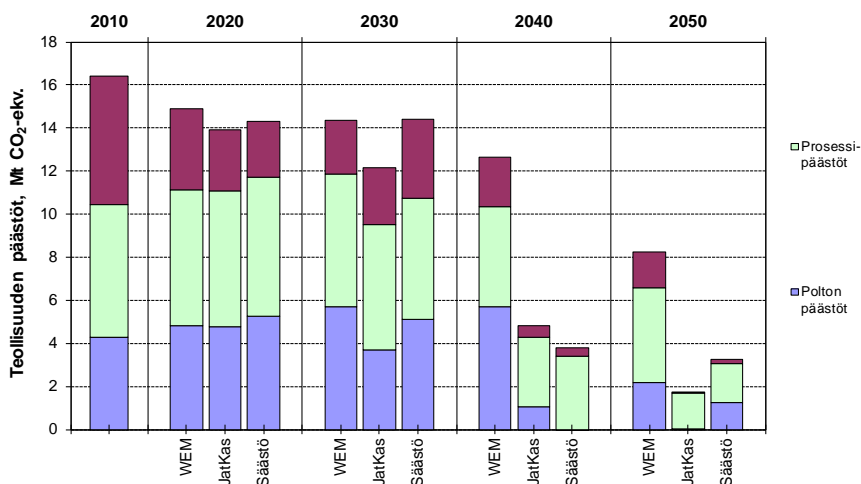
7.3 Teollisuus

Teollisuudessa keskeisiä vähäpäästöskenaarioiden vaikutuksia ovat sähköistymisen prosessilämmön tuotannossa ja fossiilisten polttoaineiden ja turpeen korvaaminen biopolttoaineilla. Lisäksi yhtenä keskeisenä oletuksena on malmipohjaisen hiiliteräksen valmistusprosessin vaihtuminen suorapelkistykseksi vuoden 2030 jälkeen korvaamalla koksien käyttö pelkistimenä joko vedyllä tai elektrolyyttisellä prosessilla. Sementin valmistuksen päästöjä voidaan vähentää hybridiuuneilla, joissa noin puolet polttoaineesta on mahdollista korvata sähköllä. Säästö-skenaariossa, jossa CCS on käytettävissä, voidaan sitä soveltaa sementin valmistuksessa, polttoaineiden jalostusprosesseissa sekä rajoitetussa mitassa sellunvalmistuksessa.

Teollisuuden kasvihuonekaasupäästöt pysyvät tulosten mukaan sekä WEM- että Säästö-skenaariossa noin 14 Mt:n tasolla vuosina 2020–2030, mutta Jatkuvan kasvun skenaariossa ne alkavat tuntuvasti pienentyä jo vuoteen 2030 mennessä (kuva 33). Vuosien 2030 ja 2040 välillä päästöt vähenevät kummassakin vähäpäästöskenaariossa alle viiden miljoonan tonnin, jolloin suurin pudotus, 6–8 Mt, saadaan polttoaineiden polton päästöissä. Vuoteen 2050 mennessä vetyteknologian ja CCS-sovellusten (Säästö) ansiosta myös prosessipäästöissä saavutetaan noin 70 %:n vähennys vuoteen 2010 verrattuna, ja polton päästöt voidaan Jatkuvan kasvun skenaariossa lähes nollata, suurelta osin sähköistymisen ja hiilineutraalien uusiutuvien ja synteettisten polttoaineiden avulla. Teollisuuden energian loppukulutuksen jakaumaa energialähteittäin on havainnollistettu alla (Kuva 34).

Vaikka Suomessa ei ole käytännössä lainkaan fossiilisten polttoaineiden primääristä tuotantoa, öljynjalostus on ollut Suomessa varsin tärkeä energiateollisuuden

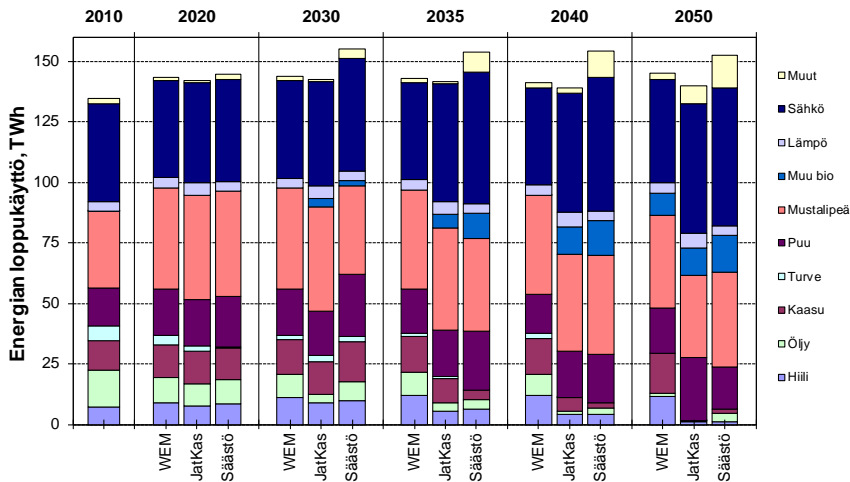
ala. Porvoon öljynjalostamon alue on Pohjoismaiden suurin petrokemianteollisuuden keskittymä, ja toinen jalostamo sijaitsee Naantalissa. Jalostamoiden yhteenlaskettu raaka-ainesyöttö on ollut 2000-luvulla vuosittain 12–15 miljoonaa tonnia. Niiden polttoaineperäiset kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2015 yhteensä 2,3 Mt CO₂-ekv. ja prosessipäästöt 0,8 Mt, jotka olivat yhteensä lähes 7 % kaikista polttoaineiden ja teollisuusprosessien päästöistä. Biodieselin tuotannosta huolimatta mineraaliöljyn jalostuksen volyymin kehitys ei ole toistaiseksi osoittanut merkkejä kääntymisestä laskuun. Vähäpäästöskenaarioiden päästötavoitteiden kannalta öljynjalostuksen tuleva kehitys on siten varsin keskeinen.



Kuva 33. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys teollisuudessa skenaarioittain.

Tarkastelluissa skenaarioissa mineraaliöljyn jalostuksen volyymin oletettiin pysyvän lähes nykytasolla vuoteen 2030 saakka ja WEM-skenaariossa edelleen vuoteen 2050 asti. Vähäpäästöskenaarioissa volyymien sallittiin pudota 30–50 % vuoden 2016 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jotta vuosille 2035–2050 asetettu päästötavoite voidaan saavuttaa. Tuloksissa volyymin pudotukset ovat pienimpiä Säästö-skenaarioissa ja suurimpia Jatkuvan kasvun skenaarioissa. Vähäpäästöskenaarioiden tulosten mukaan päästöt ovat vuonna 2050 1,2–1,4 Mt CO₂-ekv. Jalostukseen käytetyn vedyn valmistuksen päästöt on tällöin nollattu joko CCS:n tai elektrolyysillä tuotetun vedyn avulla. Jäljelle jäävät öljynjalostuksen päästöt ovat siis kuitenkin yhä tuntuvat, joten tarkempi analyysi edullisimmista öljynjalostuksen päästöjen lisävähennykskeinoista olisi jatkotarkasteluiden kannalta tarpeellista.

Mineraaliöljyn kotimaisen kulutuksen supistuessa öljynjalostuksesta tulee yhä suuremmissa määrin vientiteollisuutta, mikä luonnollisesti kompensoi sen päästöjen aiheuttamaa rasitetta kansantaloudelle, kun pyritään syviin kansallisiin päästövähennyksiin. Skenaariotulosten perusteella parhaimmillaan noin 70 % tuotannosta menisi vientiin.

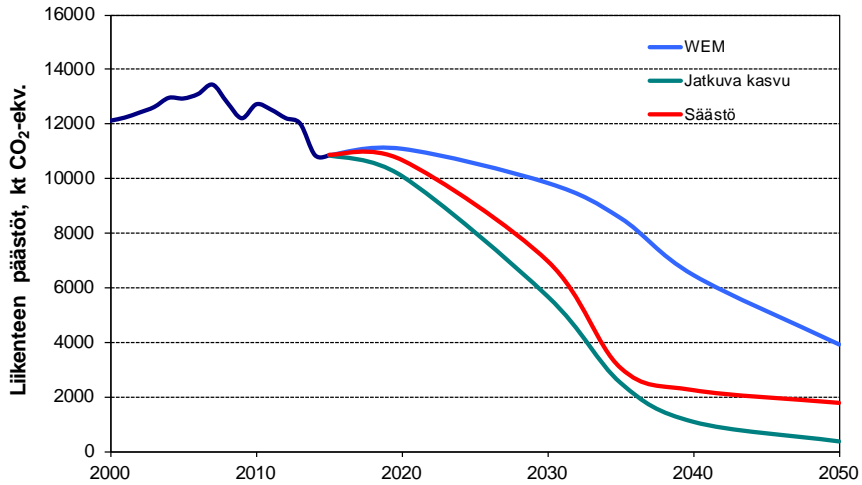


Kuva 34. Energian loppukulutus teollisuudessa skenaarioittain ("muut" sisältää muun muassa vedyn ja synteettiset polttoaineet).

7.4 Liikenne

Liikenteen osalta tarkastellaan tässä vain kotimaanliikennettä, vaikka laskentamallissa on mukana myös kansainvälinen lento- ja laivaliikenne. Kotimaanliikenteen kasvihuonekaasujen kehitys kääntyi vuonna 2010 selvään laskuun, mutta lasku pysähtyi vuonna 2016. Syinä päästöjen kääntymiselle nousuun vuosina 2016–2017 ovat olleet toisaalta polttoaineen kulutuksen kääntyminen kasvuun tieliikenteessä ja toisaalta bio-osuuden selvä lasku. Bio-osuuden vaihtelua selittää kansallinen sekoiteluote, jonka mukaista bio-osuuden lisäystä Suomi on toteuttanut hieman etupainotteisena. Toisaalta tieliikenteen suoritteet ovat kuitenkin pysyneet VTT:n LIISA 2018 laskentajärjestelmän mukaan tasaisina tai jopa hieman vähentyneet, joten kulutusmuutoksen todellinen syy jää osin epäselväksi.

Tulosten mukaan päästöt kasvavat WEM-skenaariossa lievästi vuoteen 2020 saakka, mutta kääntyvät sen jälkeen laskuun (kuva 35). Vähäpäästöskenaarioissa päästöura erkaneekin jo vuonna 2020 oletettujen lisätoimien ansiosta, ja kääntyy sen jälkeen jyrkkään laskuun vuoteen 2035 saakka, jonka jälkeen päästöjen lasku jatkuu hitaampana. Saavutettaessa hiilineutraalisuus vuonna 2035 liikenteen kasvihuonekaasupäästöt ovat Jatkuvan kasvun skenaariossa enää noin 2,5 Mt ja Säästö-skenaariossa noin 3 Mt. Vuonna 2050 Jatkuvan kasvun skenaariossa liikenteenkin päästöt joudutaan rajoittamaan jo hyvin lähelle nollaa, mutta Säästö-skenaariossa vähennys 1,8 Mt:n tasoon on CCS:n soveltamisen ansiosta riittävä. Kummassakin skenaariossa liikenteen päästönvähennykset saavutetaan valtaosin teknologisin keinoin, sillä liikkumistapojen muutokset oletettiin melko pieniksi.



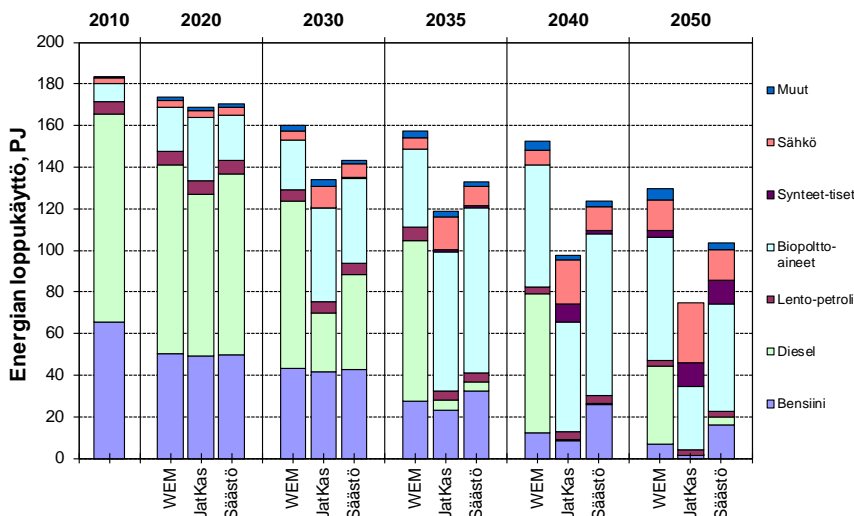
Kuva 35. Kotimaanliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys skenaarioittain.

Yhtenä keskeisenä osana uusiutuvan energian käytön lisäystavoitteita on energia- ja ilmastostrategiassa (TEM 2017) ja KAISU:ssa (YM 2017) esitetty tavoite nostaa liikenteen uusiutuvien energialähteiden osuutta. Tieliikenteessä vuodelle 2030 on asetettu 30 % biopolttoaineiden jakelovelvoite (Finlex 2019), joka toteutuu sekä Säästö- että Jatkuvan kasvun skenaariossa. Liikenteen polttoaineista fossiilinen bensiini ja diesel voidaankin teknisesti korvata lähes kokonaan biopolttoaineilla tai siirtymällä sähkö-, hybridi- tai polttokennoajoneuvoihin. Tarkastelluissa skenaarioissa on oletettu etanolin osuuden voivan nousta vain 10 %:iin tavanomaisesta moottoribensiinistä, mutta sen lisäksi markkinoille tulee kuitenkin myös toisen sukupolven biobensiiniä, jolla fossiilinen bensiini voidaan korvata käytännössä kokonaan, samoin kuin biodieselillä voidaan korvata fossiilinen dieselöljy. Lentoliikenteessä on vastaavasti oletettu biokerosiinia tulevan markkinoille biodieseliin verrattavissa olevin tuotantokustannuksin.

Biokaasun käyttöä ajoneuvoissa voidaan myös laajentaa tuntuvasti, mutta sen merkitys jää kokonaisuutena paljon muita biopolttoaineita pienemmäksi. Biokaasun valmistus synteettisesti esimerkiksi kiinteästä biomassasta ei ole kestävän raaka-aineen rajallisuuden ja hinnan vuoksi skenaarioissa taloudellisesti kannattavaa. Kaasun teknis-taloudellisesti kannattava tuotantopotentiaali ei siten kasva kovin merkittäväksi ja toisaalta päästöjen vähentämisen kannalta edullisia kaasun käyttökohteita on muuallakin kuin liikenteessä. Maatalouden vähenevät kotieläinmäärät pienentävät myös lannasta saatavissa olevan biokaasun potentiaalia.

Tulosten mukaan biopolttoaineiden osuus on vuonna 2030 WEM-skenaariossa noin 16 % liikenteen loppukäytöstä, Jatkuvan kasvun skenaariossa peräti noin 35 % ja Säästö-skenaariossa noin 30 %. Jatkuvan kasvun skenaariossa bio-osuus nousee siis sähköautojen markkinaosuuden paljon nopeammasta kasvusta huolimatta

hieman suuremmaksi kuin Säästö-skenaariossa, mikä johtuu polttoaineen markkinatilanteen ja ulkomaankaupan eroista. Säästö-skenaariossa, jossa ajoneuvotekniikka pysyy polttomoottorivaltaisena, myös liikenteen päästöjen väheneminen on sen vuoksi huomattavasti hitaampaa. Vuonna 2050 biopolttoaineiden osuudet ovat 41 % Jatkuvan kasvun skenaariossa ja 53 % Säästö-skenaariossa, mutta niiden lisäksi synteettisten polttoaineiden (vety, metanoli) merkitys nousee kummassakin skenaariossa huomattavaksi erityisesti raskaassa liikenteessä.



Kuva 36. Energian loppukulutus kotimaanliikenteessä skenaarioittain.

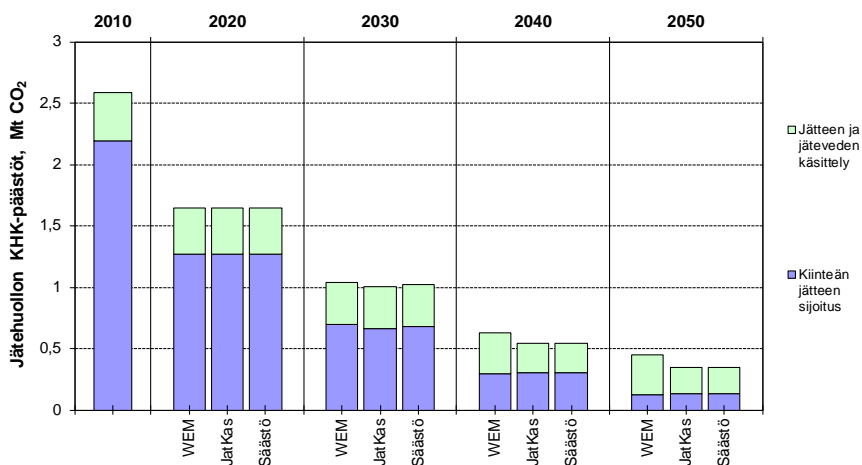
7.5 Jätehuollon sektori

Jätehuollon kasvihuonekaasupäästöjen merkitys on historiallisesti ollut huomattava erityisesti kaatopaikkasijoituksen metaanipäästöjen takia, mutta jätteiden lajittelun ja kierrätyksen kehittymisen myötä päästöjen määrä on ollut 2000-luvulla voimakkaassa laskussa. Jätehuollon päästöt aiheutuvat kaatopaikkasijoituksesta, kompostoinnista, mädätyksestä ja jätevesien käsittelystä. Vaikka jätteen energiahyödyntäminen on osa jätehuoltoa, sen päästöjä ei tilastoida jätehuollon sektorilla.

Vuosina 2000–2017 jätehuollon kokonaispäästöt vähenivät inventaarien mukaan noin 50 %, ja samana aikana kaatopaikoille sijoitetun yhdyskuntajätteen määrä on vähentynyt 1,58 miljoonasta tonnista 0,03 miljoonaan tonniin. Jätteen hyödyntäminen materiaalina ja energiana on vastaavasti kasvanut merkittävästi. Koska kaatopaikoille sijoitettavan jätteen määrä on supistunut 98 %, kiinteän jätteen aiheuttamat metaanipäästöt tulevat vähenemään tulevaisuudessa jätteen hajoamisen myötä. WEM-skenaariossa kaatopaikkakaasun talteenottoa tehostetaan lisäksi jonkin verran vanhoissa täytöissä, joissa kaasua saattaa vielä karata ilmaan run-

saastikin. Tämän lisäksi jätehuollon päästöjä voidaan vähentää jonkin verran parantamalla jätteen ja jäteveden biologisia käsittelyprosesseja, mutta lisätoimien vaikutukset kasvihuonekaasujen kokonaistaseeseen ovat varsin pienet.

Järjestelmämallissa oli mukana muutama karkean yleisluonteisesti kuvattu tekninen lisätoimi jäteveden käsittelyn päästöjen vähentämiseksi, ja lisäksi vähäpäästöskenaarioissa oletettiin kiinteän jätteen biologisen käsittelyn metaanipäästöjen vähenevän 15 %. Näiden yhteisvaikutuksena jätteen käsittelyn päästöt olivat vähäpäästöskenaarioissa vuosina 2035–2050 noin 0,1 Mt CO₂-ekv. WEM-skenaariota pienemmät.



Kuva 37. Jätehuollon kasvihuonekaasupäästöt skenaarioittain.

8. Kansantalouden vaikutusarviot

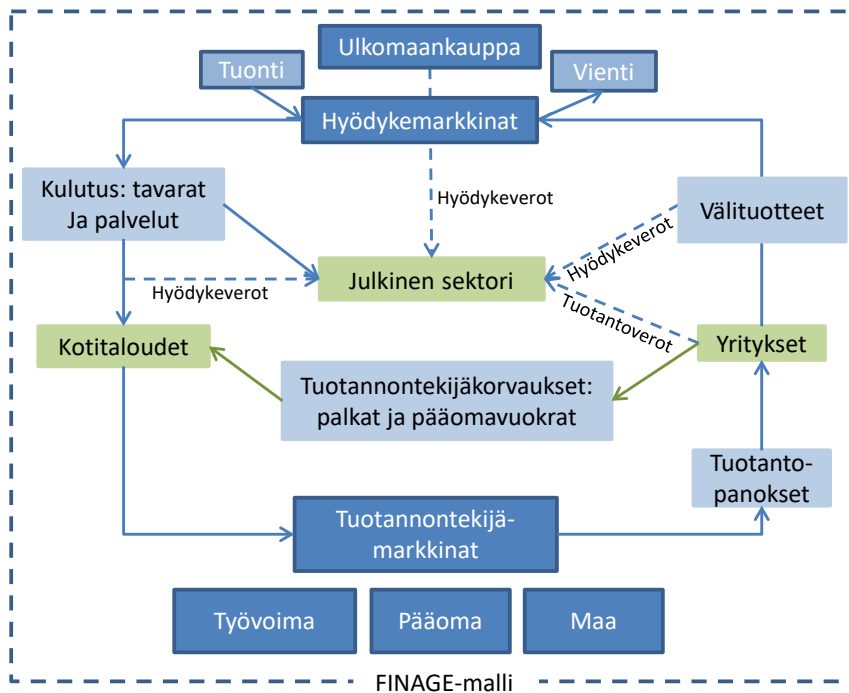
Juha Honkatukia (Merit Economics)

8.1 FINAGE-laskentamalli

Tutkimuksessa käytetty FINAGE -tasapainomallissa on perusskenaarioon kuvattuna taloutta kotitalouksien, kymmenillä toimialoilla toimivien yritysten ja julkisten sektorien päätöksistä käsin. Kotitalouksien keskeisiä päätöksiä ovat kulutus ja säästämispäätökset sekä työn tarjonta. Nämä päätökset kuvataan kansantaloudellisissa malleissa historiassa havaittujen kulutustottumusten pohjalta, joiden lisäksi kulutuksen kehityksessä otetaan huomioon hyödykkeiden suhteellisten hintojen ja kotitalouksien käytettävissä olevien tulojen kehitys.

Yritykset päättävät tuotantopanosten – työ, pääoma ja väli tuotteet – käytöstä yrityksen maksimoimaan tuotannon katetta sekä investointeja sen mukaan, kuinka eri toimialojen tuotto-odotukset kehittyvät ja suhteutuvat toimialojen historialliseen kasvuvauhtiin ja pääoman tuottoasteeseen. Julkisten sektorien toimintaa kuvaavat ennen kaikkea verotuksen rakenne sekä tulonsiirrot kotitalouksille ja toisille julkisille toimijoille. Ulkomaita tarkastellaan lähinnä viennin ja tuonnin näkökulmasta, mutta myös kansantalouden ulkoisen velan ja varallisuuden kehittymistä seurataan, ja pitkän aikavälin tarkastelussa ulkoinen tasapaino nousee mallinyhtälöissä määrääväksi.

Mallissa kysynnän ja tarjonnan tasapaino toteutuu hintamekanismin kautta. Mallin osat, riippuvuudet ja rakenne ovat pääkohdittain ja kuvaannollisesti esitetty alla (Kuva 38). Kuvassa kotitaloudet, julkinen sektori ja yritykset ovat siis taloudellisten päätöksen tekijöitä, joiden valinnoista seuraavat tavaroiden ja palveluiden kulutuskysyntä ja väli tuotekysyntä, niiden kysyntä julkisten palveluiden ja hallinnon käyttöön sekä investointikysyntä eri toimialojen investointeihin. Lisäksi kuvasta nähdään, että osa tavaroiden ja palvelujen loppukysynnästä tulee ulkomailta, ja tuontitavarat muodostavat osan tavaroiden ja palveluiden kotimaisesta tarjonnasta. Kuvasta nähdään myös tuotannontekijämarkkinat sekä tuotannontekijätulojen ja erilaisten verotuottojen kohdentuminen.



Kuva 38. Kansantalouden tasapainomallin rakenne.

Tasapainomallilla tehtävässä vaikutusarvioinnissa mallin haluttuun kohtaan tai kohtiin tehdään politiikkatoimenpidettä, päätöksenteon muutosta yms. kuvaavat muutokset, ja lasketaan malliyhtälöiden avulla uudet skenaariot, jotka yleensä esitetään numerotaulukkoina tai havainnollisemmin suhteessa perusskenaarioon. Kun tasapainomallilla lasketaan skenaarioita tulevaisuuden kehitysnäkymistä, monia keskeisistä talouskasvun ajureista määritellään mallin ulkopuolella, ja mallin tehtävä on silloin laskea sellaisten talouden tekijöiden kehitysskenaariot, jotka riippuvat näistä ulkopuolisista tekijöistä. Alla (Kuva 39) kuvataan tällaisia tyypillisiä, mallin ulkopuolisia oletuksia ja niiden roolia tasapainomallin skenaariokäytössä.

Lähes poikkeuksetta taloudellisissa tarkasteluissa käytetään mallin ulkopuolista – eksogeenista – arviota väestön kasvusta. Suomea koskevissa tarkasteluissa käytetään Tilastokeskuksen väestöennustetta. Maailmantalouden kasvuennusteet ovat yhden maan tarkasteluissa eksogeenisia, samoin arviot eri hyödykkeiden maailmanmarkkinahintojen kehityksestä ja joskus myös hyödykkeiden kysynnän kasvuvauhdista (mutta esimerkiksi viennin määrä riippuu kotimaisten hyödykkeiden mallissa määräytyvästä hintakehityksestä maailmanmarkkinahintoihin nähden).

Julkisen sektorin osalta monet asiat ovat eksogeenisia, mikä on sikäli luontevaa, että ne ovat viime kädessä seurausta politiikkaa koskevista päätöksistä. Arvioissa

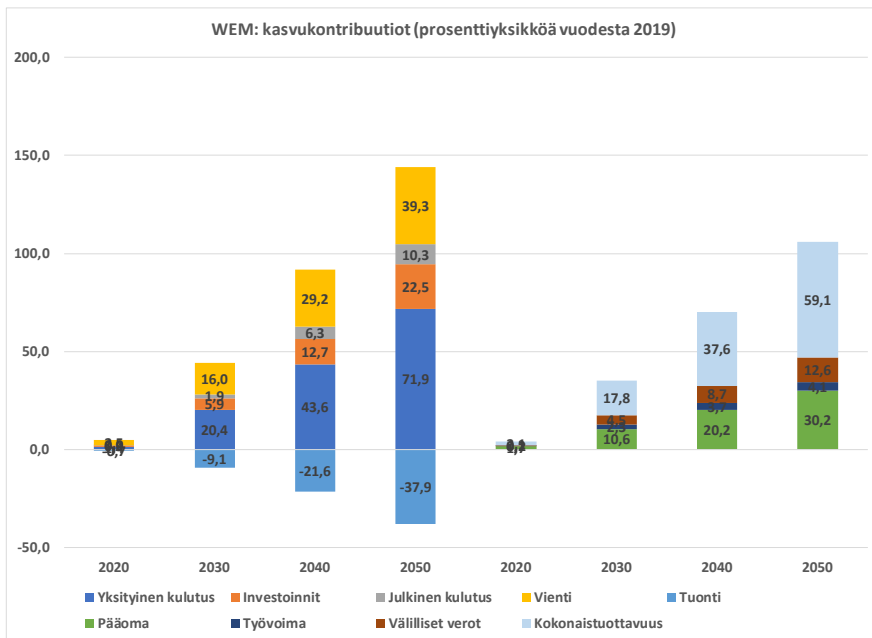
oletettu, että kotimainen biopolttoaineiden tuotanto saisi investointitukea käynnistyäkseen, kuten. Taloudellisen ohjauksen kautta syntyy aluksi huomattavan suuria verotottoja, jotka kohdentuvat selvimmin kotitalouksiin teollisuuden ja energiantuotannon irtautuessa fossiilisten polttoaineiden käytöstä teknologian kehittymisen myötä. Päästöjen vähentyessä tilanne muuttuu valtiontalouden kannalta. Tässä oletetaan, että valtiontalouden rahoitusasema suhteessa kansantuotteeseen pidetään ennallaan arvonlisäveroa sopeuttamalla. Skenaarioissa oletetaan myös, että kansantalouden ulkoinen tasapaino vakiintuu pitkällä aikavälillä siten, että vaihtotaseen suhde kansantuotteeseen on sama kaikissa skenaarioissa. Tämän sopeutumisen oletetaan tapahtuvan kotitalouksien säästämisasteen kautta.

8.2 WEM-skenaario

WEM-skenaarion lähtökohtana on EU-maiden sopima päästöjen rajoittamisen tavoitetaso, jossa toteutetaan vuodelle 2030 sovitut yhteiset tavoitteet ja edetään tavoitteita kiristäen seuraavan tavoitteen koskiessa vuotta 2045. Kansantalouden osalta skenaariossa korostuu päästöoikeuksien hinnan maltillinen nousu, ja talouden elpyminen nykyisellä pohjalla. Liikenteen ratkaisut korostavat biopolttoaineiden merkitystä. Energijärjestelmän osalta WEM-skenaario on TIMES-mallin arvioiden mukainen ja liikenteen kehitys noudattaa LVM:n arviota liikennesuoritteen ja ajoneuvokannan kehityksestä. Vaikutusarvioiden kannalta merkittävää on se, että muiden EU-maiden oletetaan toteuttavan EU:n vuodelle 2030 asettamat päästöjen rajoitustavoitteet ennen kaikkea EU:n laajuisen päästökaupan avulla. Tällöin EU:n päästöoikeuksien hinta nousee vähitellen 85 euroon hiilidioksiditonnilta vuotaan 2050 mennessä.

Talouden kehitys on jatkumoa käynnissä oleville trendeille, ja sitä leimaavat toisaalta vientiteollisuuden elpyminen, toisaalta palveluvaltaistuminen. Niinpä vuoteen 2050 mennessä yksityisten palvelujen tuotos on yli kaksinkertaistunut. Voimakainta kasvu on kuitenkin rakentamisessa sekä metallien valmistuksessa ja elektroniikkateollisuudessa. Alkutuotannon kasvua vauhdittaa osaltaan kotimaisten biopolttoaineiden jalostuksen voimakas kasvu. Myös kotitalouksien kulutus kasvaa selvästi.

Alla esitettyyn kuvaan (Kuva 40) on koottu kansantuotteen kasvua ja sen rakennetta kuvaavat kasvukontribuutiot sekä kansantuotteen kysyntäerien että tarjontäerien näkökulmista. Vuonna 2050 kasvusta yli puolet – 59,1 prosenttiyksikköä vuodesta 2017 – syntyy kokonaistuottavuuden kasvusta. Kaikkiaan kansantuote yli kaksinkertaistuu vuoteen 2050 mennessä. Kaikkiaan kansantuote kasvaa hieman yli kaksinkertaiseksi vuodesta 2019 (noin 106 prosenttia).



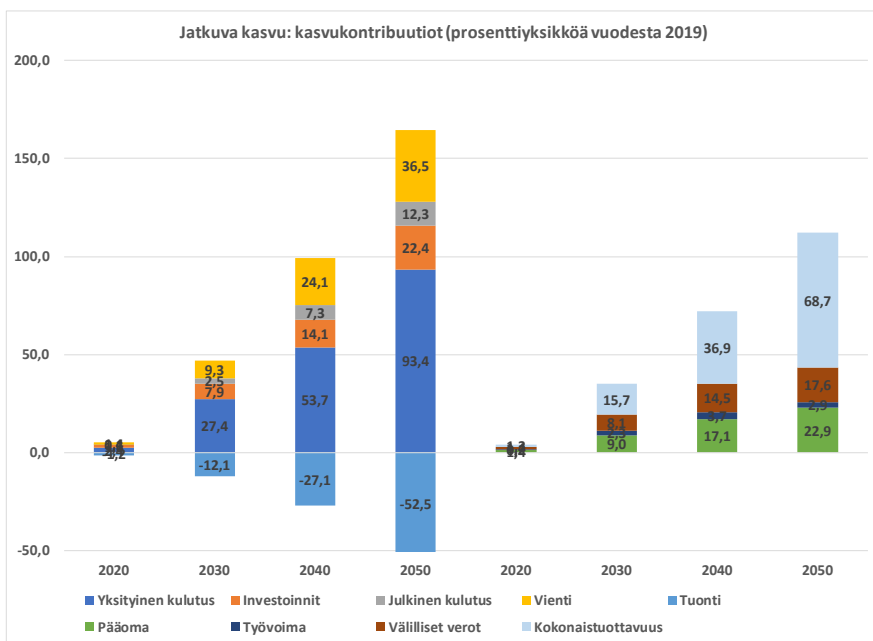
Kuva 40. Kansantalouden kasvukontribuutiot WEM-skenaariossa (prosenttiyksikköä vuodesta 2018).

8.3 Jatkuva kasvu-skenaario

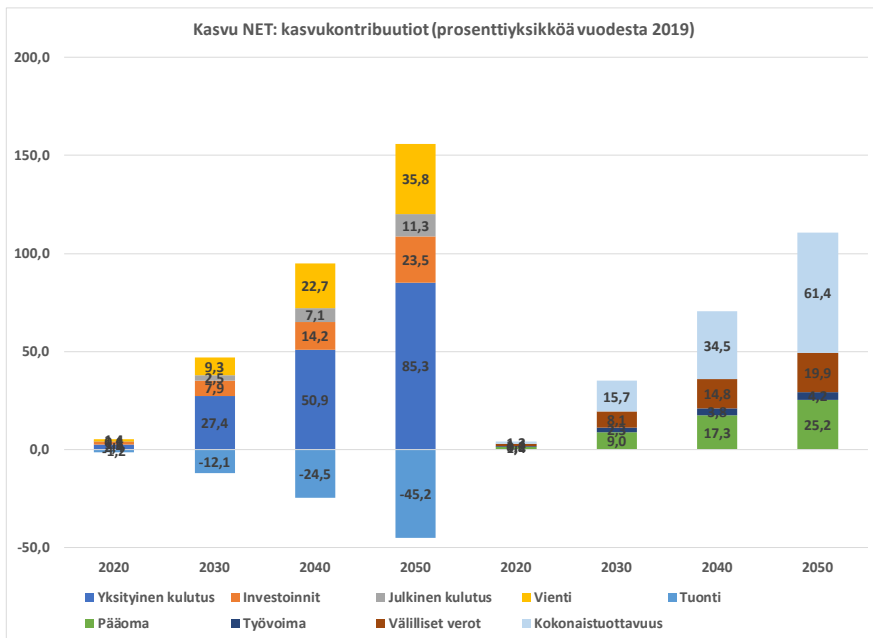
Jatkuva kasvu -skenaariossa korostuu kotimaisia resursseja hyödyntävän valmistuksen ja viennin kasvu. Skenaariossa nettoviennin kasvuvaihtelu on hyvin voimakas ja kasvua voikin hyvin kutsua vientivetoiseksi. Kasvu jakautuu WEM-skenaariota tasaisemmin eri teollisuudenaloille ja niinpä esimerkiksi kone- ja laitteollisuuden tuotannon arvo lähes kaksi- ja puolikertaistuu. WEM-skenaarioon verrattuna kasvu on pääoma- ja työvoimaintensiivisempää – pääoman ja työpanoksen vaikutus kasvuun on selvästi suurempi. Teknologian kehittymisen kautta tuleva kasvuvaihtelu on kuitenkin merkittävää. Kasvun myötä otetaan kuitenkin käyttöön uutta teknologiaa ja esimerkiksi liikenne sähköistyy hyvin nopeasti. Julkisen talouden tulot päästökaupasta ja välillisistä veroista kasvavat päinvastoin kuin kaikissa muissa skenaarioissa. Verotuksen painopiste siirtyy kulutuksen verottamista kohti muita skenaarioita selvemmin.

Päästöjen rajoittamista tarkastellaan tässä kahtaalta. Ensin oletetaan, että päästöoikeuksien hinta noudattaa EU:n ilmastostrategiassa oletettua uraa ja nousee vähitellen 85 euroon hiilidioksiditonnilta. Tätä tarkastelua esittää kuva 41, jossa talouden kasvu jatkuu ripeänä, myös kotitalouksien kulutuksella mitattuna. Kaikkiaan kansantuotteen kasvu on noin 112 prosenttia vuodesta 2019. Hiilineutraalisuuden saavuttaminen jo 2035 vaatii kuitenkin lisätoimia, joita toisessa, Jatkuva kasvu NET

-skenaariossa kuvastaa TIMES-mallinnuksen arvioima EU:n päästöoikeuksien hintatauria korkeampi rajakustannus/hintataso Suomessa. Tarkastelussa oletetaan, että skenaarion uudet teknologiat ja tuotteet syntyisivät joka tapauksessa, mutta nyt tuotannon laajenemiseen vaikuttaa kotimaisen kustannustason nousu. Kuvasta 42 näkyy, että viennin kasvu jää alemmaksi, mutta myös kulutuksen kasvu jää pienemmäksi osin kuluttajahintojen nousun, osin suhteellisesti hitaamman ostovoiman kasvun vuoksi. WEM-skenaarioon verrattuna kulutus kasvaa silti enemmän tässä teknologiavetoisessa skenaariossa.



Kuva 41. Kansantalouden kasvukontribuutiot (prosenttiyksikköä vuodesta 2018) Jatkuva kasvu -skenaariossa, jossa päästöoikeuden hinta kehittyi EU:n referenssiskenaariota (EU 2016) mukaisesti. Tässä skenaariossa Suomen hiilineutraalisuustavoite ei toteudu.



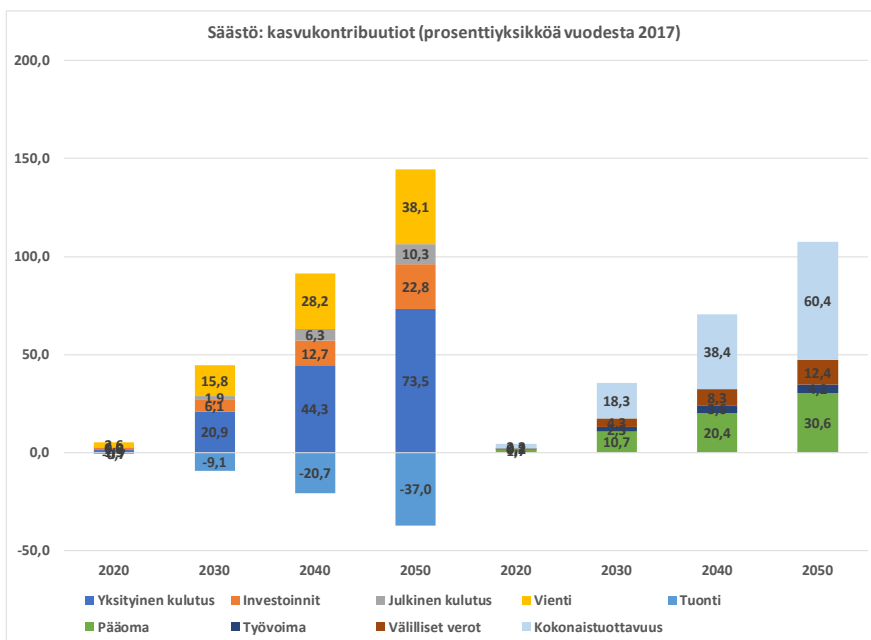
Kuva 42. Kansantalouden kasvukontribuutiot (prosenttiyksikköä vuodesta 2018) Jatkuva kasvu -skenaariossa, jossa on oletettu EU:n referenssiskenaarion (EU 2016) päästöoikeuksien hintauraa korkeampi rajakustannus/hintataso Suomessa. Tässä skenaariossa Suomen hiilineutraalisuustavoite toteutuu.

8.4 Säästö-skenaario

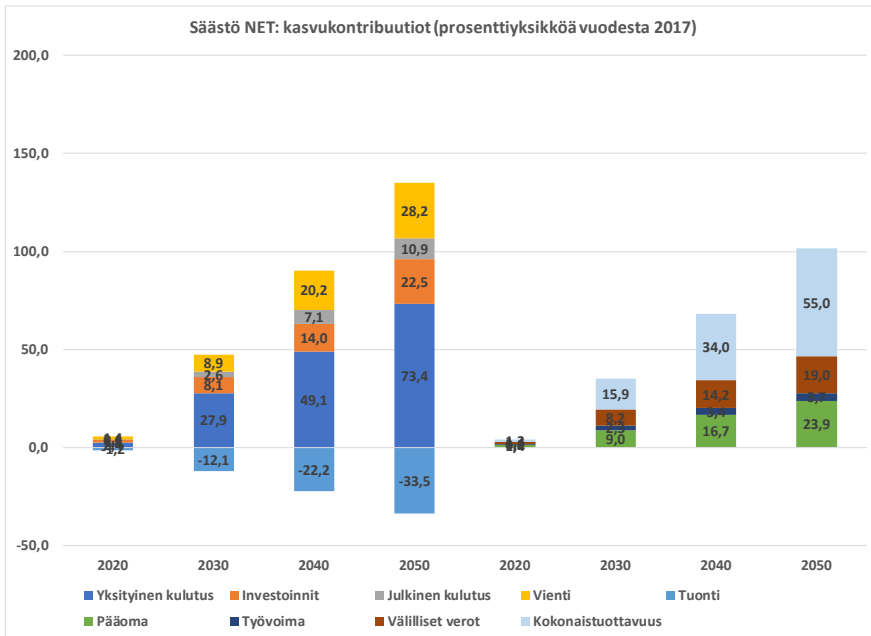
Säästö-skenaariossa korostuvat kotimaiset toimet päästöjen rajoittamiseksi, energiansäästöstä biopolttoaineisiin. Tässäkin skenaariossa syntyy kuitenkin viennillekin tilaa, mutta monien vientiteollisuuden toimialojen tuotoksen kasvu jää Jatkuva kasvu – ja Muutos-skenaarioita hitaammaksi. Liikenteen osalta kehitys on samankaltainen WEM-skenaarion kanssa. Myös kulutuksen verotus kiristyy miltei tasatahtia WEM-skenaarion kanssa. Kansantalouden kasvu jää kuitenkin hieman Jatkuva kasvu- skenaariosta. Kotitalouksiin kohdistuvaa ympäristöperusteista ohjaamista kuvaavan ympäristöperustaisen välillisen verotuksen kiristyminen jää alemmaksi kuin aiemmissa skenaarioissa, kun kotimaisten biopolttoaineiden käytön kasvun myötä hiilidioksidiverotuksen osuus pienenee.

Päästöjen rajoittamista tarkastellaan tässäkin kahtaalta. Ensin oletetaan, että päästöoikeuksien hinta noudattaa EU:n ilmastostrategiassa oletamaa uraa ja nousee vähitellen 85 euroon hiilidioksiditonnilta. Toisessa vaihtoehdossa tarkastellaan tätä taustaa vasten Suomen 2035 hiilineutraalisuustavoitetta, joka edellyttää EU:n päästöoikeuksien hintauraa korkeampaa rajakustannus/hintatasoa Suomessa.

Alla esitetyssä kuvassa (Kuva 43) on kuvattu ensimmäistä vaihtoehtoa. Säästö-skenaariossakin oletetaan otettavan käyttöön uutta, entistä tehokkaampaa teknologiaa ja niinpä kansantuotteen kasvu on WEM-skenaariota nopeampaa. Vuoteen 2050 mennessä se noin 107 prosenttia, ja ero syntyy pitkälti kotitalouksien hieman WEM-skenaariota korkeammasta kulutuksesta. Vuoden 2035 hiilineutraalisuuden tavoittelemisen vaikutukset ovat Säästö-skenaariossa Jatkuva kasvu-skenaariota suuremmat: kansantuotteen kasvu jää kuutisen prosenttia alemmaksi (Kuva 44). Talous suuntautuu enemmän kotimarkkinoille tässä Kasvu NET -skenaariossa, mutta kotitalouksien kulutus ei silti laske.



Kuva 43. Kansantalouden kasvukontribuutiot (prosenttiyksikköä vuodesta 2018) Säästö-skenaariossa, jossa päästöoikeuden hinta kehittyi EU:n referenssiskenaariota (EU 2016) mukaisesti. Tässä skenaariossa Suomen hiilineutraalisuustavoite ei toteudu.



Kuva 44. Kansantalouden kasvukontribuutiot (prosenttiyksikköä vuodesta 2018) Säästö-skenaariossa, jossa on oletettu EU:n referenssiskenaariota (EU 2016) päästöoikeuksien hintauraan korkeampi rajakustannus/hintataso Suomessa. Tässä skenaariossa Suomen hiilineutraalisuustavoite toteutuu.

8.5 Skenaarioiden vertailua

Tämän tutkimuksen skenaarioiden tavoite on kuvata kansantalouden kehitystä erilaisten teknologisten valintojen ja kehityspolkujen ja päästötavoitteiden valossa. Skenaariot eroavat toisistaan kaikissa näissä suhteissa (ennen kaikkea päästöjen rajoittamisen osalta) eivätkä ne siksi ole yksiselitteisesti vertailukelpoisia siinä mielessä, että yhdestä skenaariosta voitaisiin siirtyä toisiin tekemällä toisenlaisia valintoja. Pikemminkin skenaariot kuvaavat niitä tulemia, joihin jo hyvin lähitulevaisuudessa tehdyt valinnat ja tavoitteet voisivat johtaa.

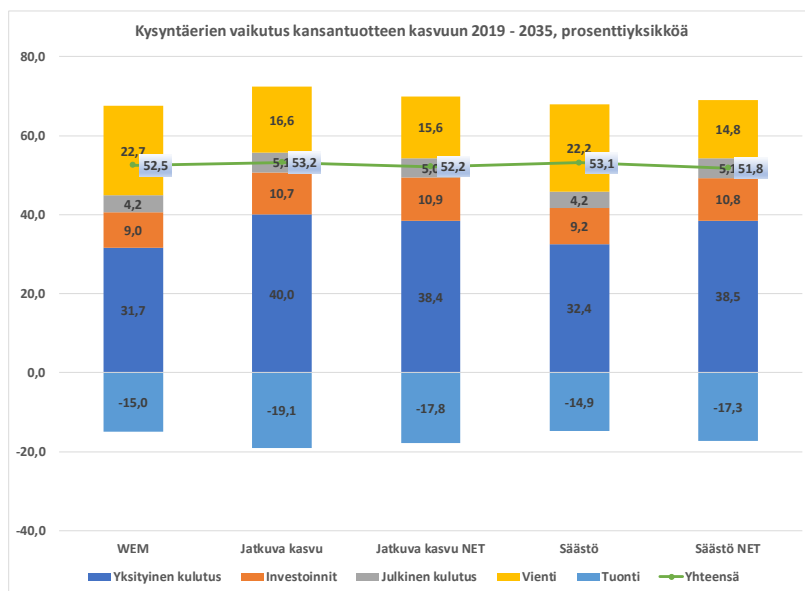
Skenaarioiden erot syntyvät teknologian ja tuotannon eroista, joita on kuvattu tutkimuksen TIMES-osiassa. Muun talouden osalta erot jäävät lopulta suhteellisen pieniksi. Vaikka skenaarioissa siis tehdään hyvinkin erilaisia valintoja teknologian ja päästöjen rajoittamisen osalta, valinnat välittyvät avaintoimialoilta muuhun talouteen maltillisesti, eikä missään skenaariossa ole kyse talouskasvun ja hyvinvointivaltion edellytysten vaarantumisesta, kuten alla esitetyistä kuvista (Kuva 45 ja Kuva 46) helposti näkyy. Kasvu kuitenkin suuntautuu hieman eri tavoin eri skenaarioissa. Teknologinen kehitys – kokonaistuottavuuden kasvu – on tulevaisuudessa keskeisellä sijalla. Uuden teknologian käyttöönotto vaatii kuitenkin entistä suurempia

investointeja – energiaa korvataan pääomalla – ja tämä näkyy pääoman kasvuvai-
 kutuksen kasvuna WEM-skenaarioon verrattuna. Päästötavoitteiden kiristyminen
 puolestaan näkyy taloudellisen ohjauksen – välillisten verojen – kasvukontribuution
 hyvinkin selvänä kasvuna.

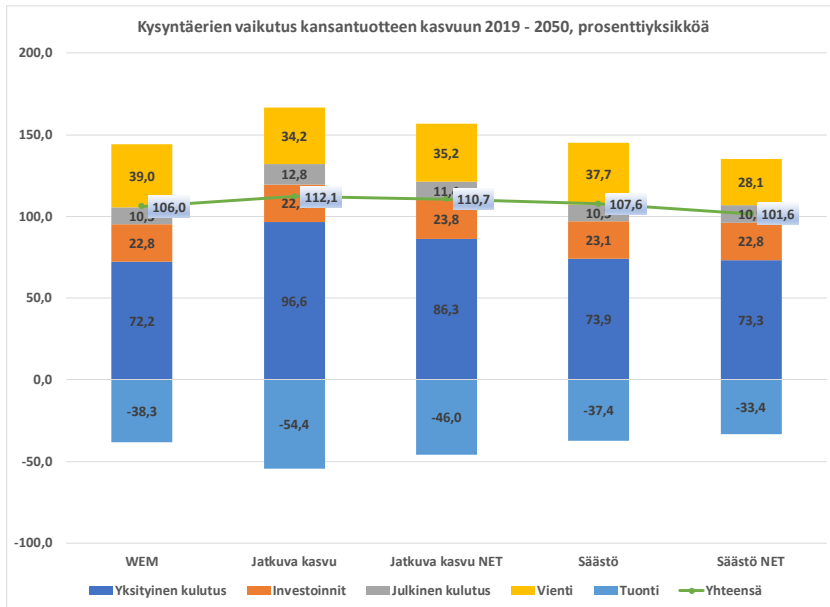
Skenaarioiden välisiä eroja taloudellisessa hyvinvoinnissa voidaan kuvata koko-
 naiskysynnän kasvuhajotelman avulla, joka on esitetty vuosille 2035 ja 2050 ku-
 vissa 47 ja 48. On ehkä syytä korostaa, että taloudellinen hyvinvointi kasvaa, vaikka
 yhteiskunta muuttuu vähähiiliseksi. Kulutuksen kasvun kautta tarkasteltuna skena-
 rioiden teknologiasta kumpuavat erot käyvät myös selvimiksi – uuden teknolo-
 gian käyttöönotto kun suuntautuu ja ajoittuu skenaarioissa varsin eri tavoin.

Sekä tarjonnan että kysynnän kautta tarkasteltuna on selvää, että hiilineutraali-
 suuden varhainen tavoittelu aiheuttaa lisäkustannuksia aiempaan päästöjen rajoit-
 tamisen aikatauluun verrattuna. Tämä ei kuitenkaan arviomme mukaan vaarana
 kotitalouksien hyvinvointia eikä julkisen sektorin rahoitusasemaa ja hyvinvointipal-
 velujen tuottamista tulevaisuudessakin.

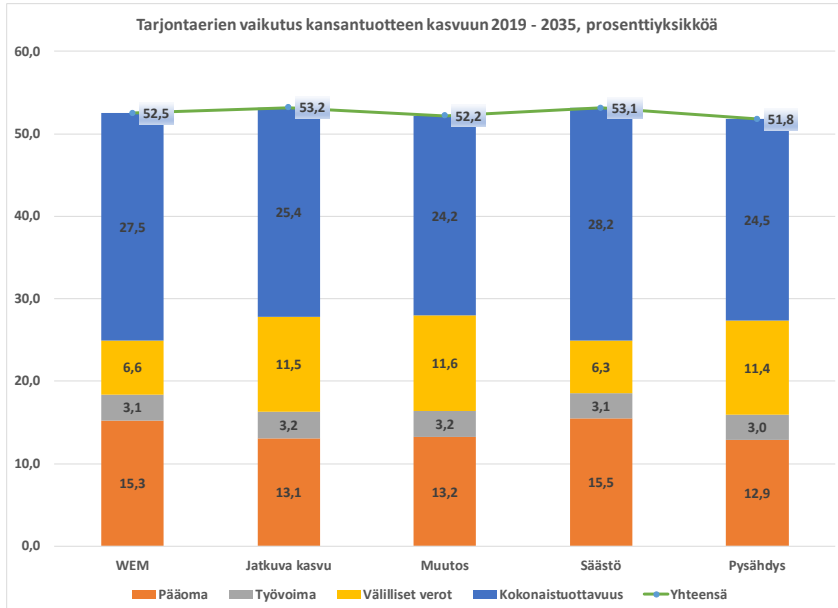
Lopuksi on kuvattu talouden rakenteessa tapahtuvia muutoksia (Kuva 49). Uu-
 den teknologian myötä kone- ja laitteellisuuden merkitys korostuu, mutta se tapah-
 tuu osittain palvelujen – lähinnä kaupan ja majoituksen – kustannuksella. Alkutuot-
 tannon osuutta kasvattaa kotimaisen raaka-ainepohjan hyödyntäminen. Hiilineut-
 raalisuuden tavoittelu vuoteen 2035 mennessä näkyy siten, että sekä yksityisten
 että julkisten palvelujen osuus korostuu, samoin rakentamisen, mikä liittyy kasva-
 neeseen investointitarpeeseen. Teollisuuden osuus jää pienemmäksi, kun kotimaisen
 kustannustason nousu heikentää viennin hintakilpailukykyä.



Kuva 45. Kansantalouden kysyntäerien vaikutus kansantuotteen kasvuun vuosina 2019–2035 (prosenttiyksikköä).



Kuva 46. Kansantalouden kysyntäerien vaikutus kansantuotteen kasvuun vuosina 2019–2050 (prosenttiyksikköä).



Kuva 47. Kansantalouden tarjontaerien vaikutus kansantuotteen kasvuun vuosina 2019–2035 (prosenttiyksikköä).

9. Ympäristövaikutusarviot (SOVA)

Sampo Soimakallio (Syke)

PITKO-hankkeessa tarkastelluille vähäpäästöskenaarioille laadittiin SOVA-lain (200/2005) mukaiset ympäristövaikutusarviot. Tässä raportissa esitetyille päivitetuille skenaariolaskelmille ei laadittu erillisiä ympäristövaikutusarvioita, mutta niistä keskeisimpiä käsitellään seuraavassa lyhyesti PITKO-hankkeen ympäristövaikutusten arviointiin perustuen (luku 9, Koljonen et al. 2019a).

SOVA-laissa ympäristövaikutuksella tarkoitetaan suunnitelman tai ohjelman välitöntä ja välillistä vaikutusta Suomessa ja sen alueen ulkopuolella:

- a. ihmisten terveyteen, elinoloihin ja viihtyvyyteen;
- b. maaperään, vesiin, ilmaan, ilmastoon, kasvillisuuteen, eliöihin ja luonnon monimuotoisuuteen;
- c. yhdyskuntarakenteeseen, rakennettuun ympäristöön, maisemaan, kaupunkikuvaan ja kulttuuriperintöön;
- d. luonnonvarojen hyödyntämiseen;
- e. a–d alakohdassa mainittujen tekijöiden keskinäisiin vuorovaikutussuhteisiin.

PITKO-hankkeessa tarkasteltiin neljän vähäpäästöskenaarion (*Jatkuva kasvu, Muutos, Säästö, ja Pysähdys*) ympäristövaikutuksia. Arviot laadittiin tarkastelemalla skenaarioita kokonaisuuksina suhteessa WEM-skenaarioon sekä tarkastelemalla skenaarioiden erillisiä elementtejä erikseen (Liite 2, Koljonen et al. 2019a). Merkittävä osa tarkasteluista oli laadullista.

Kuten tässä raportissa esitetyt päivitetyt skenaariotkin, myös aiemmat PITKO-skenaariot olivat tarinoita, jotka eivät sisältäneet poliittisia linjauksia. Päivitettyjen skenaarioiden keskeisimmiksi ympäristövaikutuksiksi voidaan tunnistaa Pitko-hankkeen tavoin vaikutukset ilmastonmuutokseen, luonnon monimuotoisuuteen, vesistöihin, uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöön sekä ihmisten terveyteen viihtyvyyteen ja hyvinvointiin.

Lähtökohtaisesti tässä raportissa tarkastelluilla päivitettyillä skenaarioilla voidaan arvioida olevan toteutuessaan myönteisiä ympäristövaikutuksia, sillä skenaariotarinoissa on lähtökohtaisesti oletettu, että alle kahden asteen ilmastotavoite onnistutaan saavuttamaan globaalisti. Tällä on todennäköisesti merkittäviä myönteisiä vaikutuksia moniin eri ympäristövaikutuksiin verrattuna WEM-skenaarioon, jossa alle kahden asteen ilmastotavoitetta ei saavuteta. Skenaarioihin liittyy kuitenkin myös sellaisia ilmastovaikutuksia, joita ei ole arvioitu tässä raportissa esitetyissä määrällisissä tuloksissa (esim. luku 10).

Skenaarioissa Suomeen tuodaan erilaisia tavaroita ja raaka-aineita, joiden tuotantoon ja hankintaan liittyvät päästöt ja muut ympäristövaikutukset syntyvät pitkälti

Suomen rajojen ulkopuolella. Toisaalta skenaarioissa lähtökohtana on se, että maailman saavuttaa alle kahden asteen tavoitteen, minkä seurauksena merkittävän hiilivuodon riskiä voidaan pitää suhteellisen vähäisenä.

Päivitetyt skenaariot poikkeavat toisistaan eri sektoreiden päästöjen ja nielujen kehityksen osalta. Merkittävin ero on metsänieluissa, jotka ovat *Säästö*-skenaariossa suurempien hakkuiden vuoksi selvästi pienemmät kuin *Jatkuva kasvu*-skenaariossa.

Kasvihuonekaasujen lisäksi ilmastovaikutuksia aiheutuu muun muassa muutok-
sista maanpinnan heijastusvaikutuksissa (albedo), mustan hiilen päästöistä ja met-
sien aerosolipäästöistä. Osa vaikutuksista on ilmastoa lämmittäviä, osa viilentäviä
ja moniin tekijöihin liittyy merkittäviä epävarmuuksia. Tässä yhteydessä ei arvioitu,
minkä suuntaisia tai suuruisia nämä vaikutukset olisivat tarkastelluissa skena-
rioissa.

Tarkastelluissa skenaarioissa energiankäyttö tehostuu ja vähenee onnistuneen
digitalisaation ja palveluvaltaistumisen kautta. Lisäksi yhdyskuntarakenteen kehiti-
tyminen on ratkaisevassa roolissa kulutuksen kehittämisessä, erityisesti liikenne-
suoritteiden osalta. Näihin ja moniin muihin kulutukseen vaikuttaviin tekijöihin liittyy
merkittäviä oletuksia, joita skenaarioiden laadinnassa on käytetty.

Tarkasteltuihin skenaarioihin liittyy myös erityyppistä rakentamista ja käytössä
olevan teknologian uusimista. Tämä lisää tyypillisesti ehtyvien luonnonvarojen käyt-
töä. Kiertotalouden onnistuminen on siten ratkaisevaa ehtyvien luonnonvarojen käy-
tön vähentämisessä ja tehostamisessa.

Säästö-skenaariossa hakkuiden lisääntyminen WEM-skenaarioon verrattuna ai-
heuttaa haasteita luonnon monimuotoisuudelle ja vesistöille. Jatkuva kasvu skena-
ariossa hakkuut jonkin verran vähenevät WEM-skenaarioon verrattuna ja siten myös
edellä mainitut haasteet saattavat lieventyä. Vaikutukset riippuvat kuitenkin hakkuu-
määrien ohella hakkuiden kohdistumisesta kivennäis- ja turvemaille, hakkuiden to-
teutustavasta, metsään jäävän lahoppuun määrästä ja monimuotoisuuden kannalta
keskeisten rakennepiirteiden säilymisestä. Metsittäminen voi aiheuttaa haasteita
maatalousluonnon monimuotoisuuden säilymiselle, erityisesti Jatkuva kasvu -skena-
ariossa. Myös maatalouden vesistövaikutukset voivat kasvaa.

Tarkastelluissa skenaarioissa ilman laatu paranee liikennesuoritteiden vähenty-
essä, sähköisen liikenteen lisääntyessä ja puun pienpolton vähentyessä korvaavien
lämmitysratkaisujen lisääntyneen käyttöönoton ja energiankäytön tehostumisen
myötä. Kävelyn, pyöräilyn ja kasvisruokailun lisääntyminen ja ympäristön viihtyisyy-
den parantuminen aikaansaavat myös terveyshyötyjä. Toisaalta yhdyskuntaraken-
teen tiivistymisen myötä entistä suurempi joukko ihmisiä altistuu ilmansaasteille ja
lisäksi viheralueiden säilyttämiseen kohdistuu haasteita.

Tarkastelluissa skenaarioissa tarvittavilla ilmastomuutoksen hillintätoimilla voi
olla myös merkittäviä ihmisten elinoloihin kohdistuvia vaikutuksia, mukaan lukien
tuloeroja korostavia vaikutuksia. Päivitetyissä skenaarioissa päästövähennysten ra-
jakustannus nousee 2030 luvulla selvästi suuremmaksi kuin Pitko-skenaarioissa
johtuen päästövähennysvaatimusten aikaistumisesta. Se, minkälaisia ohjauksel-

noja muutoksen toteuttamisessa hyödynnetään ja, miten kustannukset eri väestöryhmille kohdentuvat, vaikuttavat huomattavasti siihen, miten eri väestöryhmät muutoksen kokevat.

Tarkasteltujen skenaarioiden toteutumiseen liittyy erilaisia ja eritasoisia riskejä. Vuodelle 2035 asetetun hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen riippuu päästökehityksen ohella voimakkaasti siitä, miten hiilinielut kehittyvät. Siihen puolestaan vaikuttaa oleellisesti puuston kasvun ja hakkuiden kehittyminen, joihin liittyy erilaisia epävarmuuksia. Bioenergiaan kytketyn hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kehittymiseen liittyvät riskit voivat realisoituessaan estää Säästö-skenaarion päästötason toteutumisen. Ydinvoiman hyväksyttävyyteen liittyy omat riskinsä. Aurinko- ja tuulivoimateknologian, liikenteen sähköistymisen ja energian varastoinnin ja tehostumisen kaupallistuminen voi jäädä oletettua hitaammaksi, mikä voi osaltaan lisätä merkittävästi riskiä skenaarioiden päästötason toteutumiseksi. Vastaavasti yhdyskuntarakenteen, ihmisten arvojen, asenteiden ja käyttäytymisen kehittyminen eivät välttämättä tue skenaarioissa oletettua muutosta ja sen toteutumista riittävästi. Lopulta paljon riippuu siitä, saadaanko tavoitellun muutoksen toteuttamiseksi tarvittavat ohjauskeinot laadittua. Merkittävä riski skenaarioiden päästötasojen saavuttamiseksi voi realisoitua silloin, jos usea eri päästöjen vähentämistä hidastava tai estävä riski realisoituu samanaikaisesti.

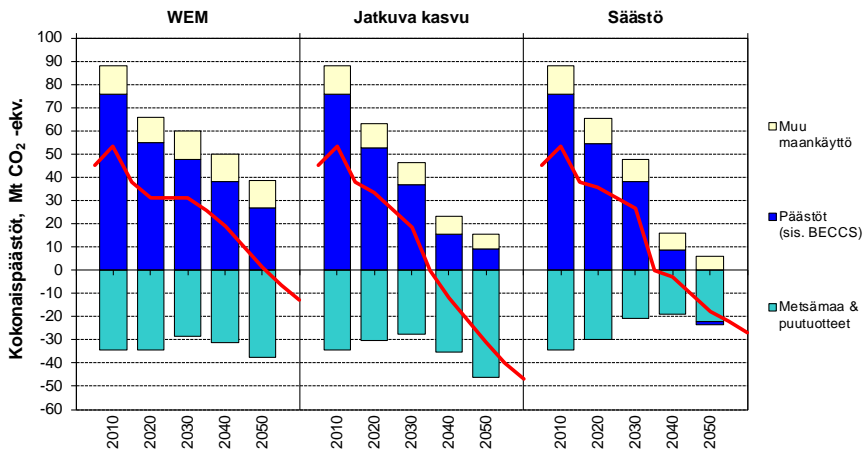
10. Kokonaispäästökehitys ja arvio hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisesta

10.1 Kokonaispäästökehitys

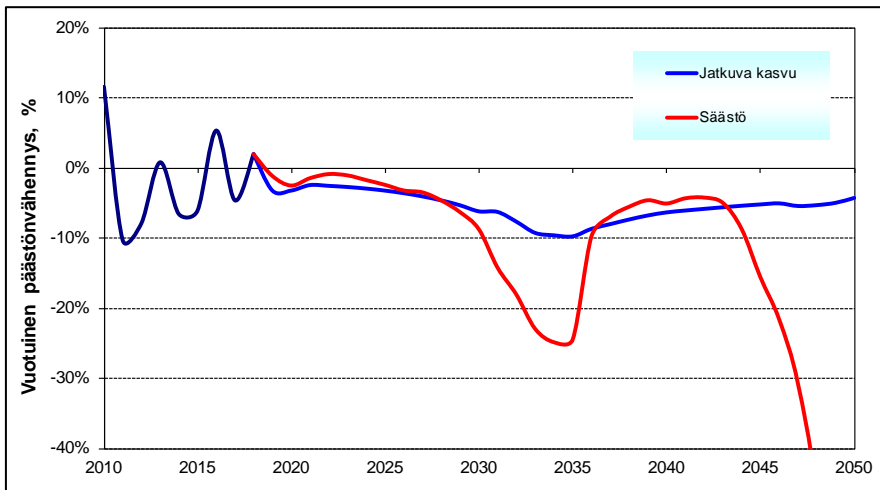
Tiina Koljonen, Antti Lehtilä ja Hanne Siikavirta (VTT)

Alla esitetyssä kuvassa 50 on esitetty kokonaispäästöjen kehitystä sekä vertailuskenaariossa (WEM) että kahdessa tarkastelun kohteena olleessa vähäpäästöskenaariossa. Kuvasta nähdään, että nykyisillä toimilla hiilineutraalisuutta ei saavuteta ennen vuotta 2050 ja silloinkin ainoastaan, jos maankäytön nettonielut ovat noin 30 Mt CO₂-ekv. -tasolla. Jatkuva kasvu ja Säästö-skenaarioissa hiilineutraalisuus sen sijaan saavutetaan vuonna 2035, mutta se edellyttää merkittävää KHK-päästöjen vähentämistä erityisesti jaksolla 2030–2035 ja lisäksi sitä, että metsien hiilinielut olisivat kuvien 21 ja 22 mukaisia. Tässä tulee myös huomata, että Jatkuva kasvu ja Säästö -skenaarioissa ei asetettu tiukempaa KHK-päästötavoitetta vuodelle 2030 kuin mitä EU:ssa on päätetty, mikä toisaalta ei ole linjassa Pariisin ilmastositomuksen mukaisen 1,5 asteen tavoitteen kanssa (ks. luku 2). Erityisesti Jatkuva kasvu -skenaariossa kustannustehokas päästövähennyspolku kuitenkin osoittaa sen, että jo vuonna 2030 KHK-päästöjä vähennetään enemmän, kuin mitä Säästö-skenaariossa, jossa puolestaan merkittävin päästövähennys realisoituu vasta vuoden 2035 tienoilla.

Päästövähennysurien eroavuudet selittyvät skenaarioiden taustalla olevista teknologiaoletuksista sekä toisaalta oletuksista liittyen teollisuuden, yhdyskunnan ja koko talouden rakenteeseen. Teknologiaoletuksista ehkä keskeisin liittyy mahdollisuuksiin hyödyntää hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS), joka skenaarioiden määrittelyiden mukaan toteutuu Säästö-skenaariossa vuoden 2030 jälkeen, mutta ei Jatkuva kasvu -skenaariossa koko tarkastelujaksonea. Lähtöoletukset liittyen metsäteollisuuden kehitykseen Suomessa liittyvät puolestaan keskeisesti maankäytön nettonielujen kehitykseen ja sitä myöden myös tarvittavaan KHK-päästövähennysmäärään, jotta hiilineutraalisuus saavutettaisiin. Säästö- skenaariossa oletettiin, että metsäteollisuus kehittyy ja laajenee, minkä vuoksi myös kotimaisen puuraaka-aineen kysyntä kasvaa. Säästö-skenaariossa panostettiin suhteessa enemmän myös kestävien biojalosteiden tuotantoon ja toisaalta biojalosteiden kysyntä oli myös hieman suurempi, jotta raskaan tieliikenteen kysynnän kasvu pystytään kattamaan. Säästö-skenaariossa maankäyttösektorin nettonielut laskivat siten noin 12 Mt CO₂-ekv. tasolle, kun Jatkuva kasvu -skenaariossa maankäyttösektorin nettonielut olivat noin 18 Mt CO₂ -ekv., kun metsien nielun laskentaperiaatteena oli varastonmuutosmenetelmä.



Kuva 50. Kokonaispäästökehitys eri skenaarioissa huomioiden sekä kasviuonekaasupäästöt että LULUCF-sektorin kehitykset. Kuvan punainen viiva kuvaa nettopäästöjä kyseisenä tarkasteluvuotena. Päästö-sektori sisältää myös teknisesti saatettavat negatiiviset CO₂-päästöt (i. BECCS).



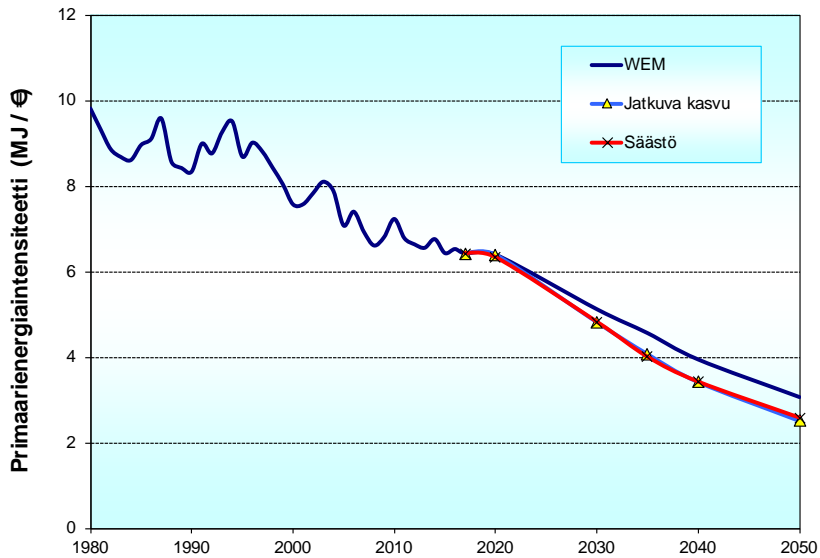
Kuva 51. Kasviuonekaasujen vuotuisten päästönvähennysten kehitys 2010–2018 sekä tarkastelluissa vähäpäästöskenaarioissa vuoteen 2050.

Kansallisten ohjauskeinojen tarve tulee korostumaan, mikäli vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen edellyttää hyvin nopeita päästöjen leikkauksia eikä päästöoikeuksien hinta nouse riittävän voimakkaaksi kannustimeksi. Energijärjestelmän pääomakannan pitkävaikutteisuuden takia päästöjä kannattaa normaalisti vähentää korkeintaan vanhan kannan poistuman mukaisessa tahdissa, eli keskimäärin muutamia prosentteja vuodessa. Esimerkiksi viisivuotisjaksolla 2013–2018

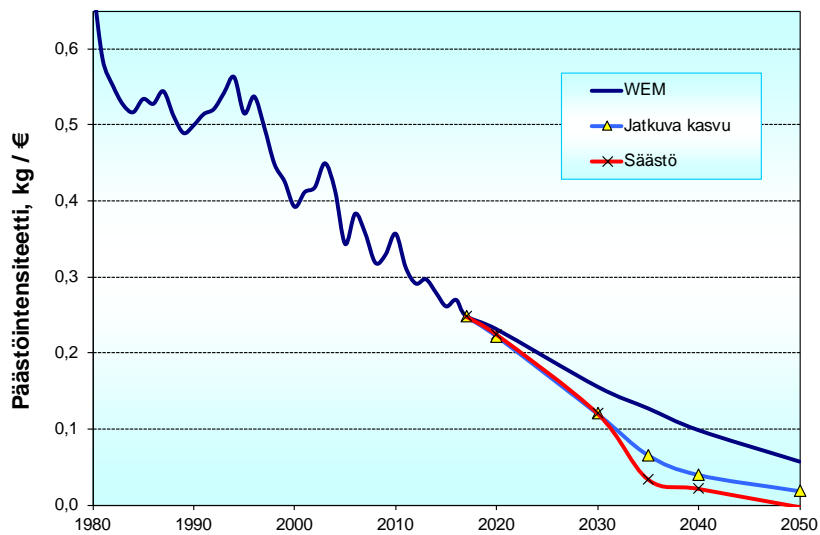
päästöt vähenivät keskimäärin 2,2 % vuodessa eli varsin kohtuullista tahtia. Yksittäisinä vuosina, kuten 2011, päästöt ovat toki heilahdelleet voimakkaamminkin sääolojen tai muun satunnaisen vuosivaihtelun ansiota. Tarkastelluista vähäpäästöskenaarioista ohjauskeinojen tarpeen voidaan odottaa olevan Säästö-skenaariossa merkittävästi suurempi kuin Jatkuva kasvu -skenaariossa, sillä edellisessä tarvittavat vuotuiset päästönvähennykset nousevat vuosina 2033–2035 yli 20 %:n, kun jälkimmäisessä se pysyy koko ajan 10 %:n tason alapuolella (kuva 51). Säästö-skenaariossa vuotuinen päästövähennys vuoden 2045 tienoilla kääntyy jyrkkään kasvuun lähinnä BECCS-investointien vuoksi – EU:n päästövähennystavoitteen kiristyessä ja päästöoikeuden hinnan noustessa Suomen kannattaa investoida BECCS-tekniikkaan ja myydä päästöoikeuksia.

Herkkyystarkastelun avulla, jossa laskelmat tehtiin ilman vuodelle 2035 asetettua hiilineutraalisuustavoitetta, voitiin nähdä, että energiaverojen harmonisointi ja verotusajon maltillinen vähittäinen korottaminen vähentäisivät kasvihuonekaasujen päästöjä Säästö-skenaariossa vuosina 2030–2035 varsin tuntuvasti, tulosten mukaan lähes 4 miljoonaa tonnia nykyverotuksen mukaiseen tilanteeseen verrattuna.

Alla on havainnollistettu lisäksi hiilineutraalisuustavoitteen vaikutuksia talouden energia- ja päästöintensiteetteihin. Energiaintensiteetti on laskettu Suomen primaarienergian kulutuksen suhteena BKT-kehitykseen. Vastaavasti päästöintensiteetti on laskettu KHK-päästöjen (pl. LULUCF-sektori) suhteena BKT-kehitykseen. Kuvista nähdään, että sekä energia- että päästöintensiteetti on kehittynyt suotuisasti jo 1990-luvulta lähtien. Erityisesti päästöintensiteetti on laskenut merkittävästi 2000-luvulla. Toisaalta myös nähdään, että vuoteen 2050 mennessä energiaintensiteetin tulisi edelleen laskea puoleen nykytasosta ja päästöintensiteetin laskea vastaavasti lähelle nollassa. Päästöintensiteetissä nähdään erityisesti Säästö-skenaariossa merkittävä lasku vuonna 2030–2035. Toisaalta energiaintensiteeteissä ei ole merkittävää eroa Jatkuva kasvu ja Säästö -skenaarioiden välillä. Lisäksi kannattaa huomata, että myös WEM-skenaariossa energiaintensiteetti laskee, eli energiankäyttö tehostuu jo nykytoimin. Tässä kannattaa kuitenkin huomata, että WEM-skenaariossa päästöoikeuden hintataso noudatti komission ohjeistusta, ja edellyttäisi siten, että päästöoikeuden hinta nousisi kaksinkertaiseksi nykyisestä noin 25 €/t CO₂-vuoteen 2040 mennessä ja päätyisi noin 90 €/t CO₂-hintatasoon vuoteen 2050 mennessä.



Kuva 52. Talouden energijaintensiteetin kehitys WEM-skenaariossa ja vähäpäästöskenaarioissa.



Kuva 53. Talouden päästöintensiteetin kehitys. Päästöihin on laskettu Kioton pöytäkirjan mukaiset kasvihuonekaasupäästöt, mutta ei maankäytön päästöjä tai nieluja (l. LULUCF-sektoria).

10.2 Arviot tarvittavista toimenpiteistä

Tiina Koljonen (VTT), Heikki Lehtonen (Luke), Sampo Soimakallio (Luke), Tarja Tuomainen (Luke)

Tässä raportissa on esitetty vaikutusarvioita liittyen vuodelle 2035 asetettuun hiilineutraalisuustavoitteeseen sekä KHK-päästöjen ja -poistumien kehityksestä vuoteen 2050 asti. Vaikutusarvioihin ei ole sisällytetty laskennallista analyysiä niistä konkreettisista toimista tai poliittisista päätöksistä, joita hiilineutraalisuustavoitteen tai vuodelle 2050 tarkasteltujen tavoitteiden saavuttaminen edellyttäisi, joten alla on esitetty joitain yleisiä johtopäätöksiä perustuen skenaariolaskelmissa tehtyihin lähtöoletuksiin. Vähäpäästöskenaarioiden taustaoletukset olivat suureksi osaksi määritetty aiemman PITKO-hankkeen aikana skenaariotyöpajoissa. Tässä raportissa esitettyihin analyysihin otettiin PITKO-hankkeen aikana luodusta skenaariomatriisista mukaan kuitenkin vain kaksi vaihtoehtoista polkua, joiden määrittelyitä päivitettiin osittain. Lisäksi vertailu-, eli WEM-skenaarioon, tehtiin pieniä päivityksiä perustuen uusimpiin tilastoihin ja muihin tietoihin. Kannattaa siten huomata, että tässä raportissa esitetyt skenaariotulokset eivät ole enää vertailukelpoiset helmikuussa 2019 julkaistuihin laskelmiin erityisesti hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisen näkökulmasta.

Tässä raportissa esitettyjen skenaariolaskelmien perusteella hiilineutraalisuus olisi mahdollista saavuttaa WEM-skenaariion mukaisella KHK-päästöjen ja maankäytön nettonielujen kehityksellä, l. nykytoimilla huomioiden vuoteen 2020 ulottuvat päätökset ja toimet, vuoden 2050 tienoilla. On siten selvää, että hiilineutraalisuustavoitteen saavuttaminen vuoteen 2035 mennessä edellyttää ripeitä toimia ja poliittisia päätöksiä, joilla KHK-päästöjä vähennetään kaikilla sektoreilla ja lisäksi varmistetaan maankäytön nettonielujen suotuisa kehitys. Vähäpäästöskenaariolaskelmien mukaan fossiilisten polttoaineiden käytön merkittävä vähennys paitsi energiantuotannossa myös liikenteessä ja teollisuudessa vuoteen 2035 mennessä on edellytys hiilineutraalisuustavoitteeseen pääsemiseksi. Säästö-skenaariossa, jossa oletettiin laajeneva trendi metsäteollisuuden tuotannolle ja lisäksi merkittävä panostus korkean lisäarvon biotuotteisiin, metsänielut supistuivat vuoden 2035 tienoilla, jonka vuoksi vuotuinen päästövähennystarve kasvoi yli 20 %:in ennen vuotta 2035. Näin merkittävä vuotuinen päästövähennys on käytännössä hyvin haastavaa toteuttaa, mikä osoittaa sen, että vuoden 2030 KHK-päästövähennystavoitetta tulisi tiukentaa nykyisestä (l. 39 % Suomen taakanjakosektorilla 2005 -päästöihin verrattuna ja 40 % koko EU:n tavoite vuoden 1990-tasoon verrattuna). Tämä on toisaalta linjassa sekä Pariisin ilmastopöytäkirjan edellyttämän KHK-päästövähennysuran että toisaalta EU:n ns. Green Deal-esityksen (EC 2019) kanssa. On esitetty, että EU:n tulisi pyrkiä yli 50 % KHK-päästövähennystavoitteeseen vuoteen 2030 mennessä, kun nykyinen politiikka tähtää 40 % KHK-päästövähennykseen (vertailuvuosi 1990). Nykyistä tiukempi vuoden 2030 päästötavoite ja siihen liittyvät kansalliset toimet varmistaisivat 2035 hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisen kustannustehokkaasti, koska infrastruktuurin uusiutuminen toteutuisi tasaisemmin ja muutokseen olisi mahdollista sopeutua hieman pidemmällä aikajänteellä.

Hiilineutraalisuuteen tähtäävät skenaariolaskelmat osoittivat, että päästöjen vähentämisen rajakustannus nousee korkeammaksi kuin mitä laskelmissa oletettu EU-päästöoikeuden hinta. Jotta tarvittavat investoinnit ja muut päästövähennystoimet toteutuisivat, tarvitaan siten kansallista lisäohjausta, kuten vero-ohjausta, investointi- ja muita tukia tai jopa kieltoja ja rajoituksia. Säästö-skenaariossa oletettiin, että energiaverotuksessa luovutaan teollisuuden veronpalautuksista ja fossiilisten polttoaineiden tuista lämmöntuotannossa ja maataloussektorilla. Lisäksi oletettiin, että energiaveroja korotetaan vähittäin vuodesta 2021 alkaen. Näillä energiavero- ja -tukimuutoksilla saavutettiin 3–4 Mt CO₂ päästövähennys vuosina 2030–2035. Päästövähennys johtui pääosin F turpeen käytön vähentymisestä, mutta myös fossiilisen CHP-tuotannon ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentymisestä maataloudessa sekä kiinteistöjen erillislämmityksessä. Säästö-skenaariossa toisaalta oletettiin myös, että energijärjestelmän sähköistymistä voidaan edistää alentamalla suurten sähkönkäyttäjien (I. sähköveroluokka II) sähköverot EU:n asettamalle minimitasolle. Samalla palvelusektori siirrettiin Säästö-skenaarion laskelmissa alempaan sähköveroluokkaan II. Skenaariolaskelmien tulosten perusteella voidaan havaita, että alempi sähkövero kannustaa investoimaan erityisesti suuremman kokoluokan lämpöpumppeihin, aurinkosähköön ja teollisuuden sähköistymiseen. Toisaalta suorat päästövähennysvaikutukset jäivät huomattavasti vaatimattomammiksi kuin mitä fossiilisten lämmityspolttoaineiden tuista luopumisen yhteydessä. Tässä yhteydessä tulee kuitenkin huomioda, että teräksen tuotannon ja öljynjalostuksen oletettiin siirtyvän uusiutuvan vedyn käyttöön lähtöoletusten mukaisesti (I. toteutuvat mallilaskelmissa eksogeenisesti), joten tältä osin jää epäselväksi, missä määrin alempi sähköverotaso toimisi kannustimena investoinneille kyseisille teollisuuslaitoksille. Liikenteen ja liikkumisen ohjaustoimia kohti hiilineutraaliutta ei tässä työssä arvioitu lainkaan, vaan käyttövoimien ja liikenteen suoritteiden oletettiin kehittyvän aiempien PITKO-skenaarioiden mukaisesti. Ohjaustoimet liittyen liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen puolittamiseen nykytasosta vuoteen 2030 mennessä oli huomioitu sekä Jatkuva kasvu - että Säästö -skenaariossa energia- ja ilmastostrategian (TEM 2017) sekä KAISU:n (YM 2017) mukaisesti, mutta toisaalta päästöjen väheneminen nollaan vuoteen 2045 mennessä oletettiin tapahtuvan markkinaehtoisesti ja ilman lisäohjausta. On siten selvää, että liikenteen päästöjen vähenemiseen liittyy merkittävää epävarmuutta.

Sekä Jatkuva kasvu - että Säästö -skenaarioissa oletettiin merkittävää teknistä kehitystä ja uuden teknologian nopeaa käyttöönottoa. Jotta kehitys toteutuisi skenaariopolun mukaisesti, tarvitaan mittavia tutkimus- ja kehittämispanoksia. Suurimmat päästöjen pistelähteet ovat teollisuudessa, jossa myös investointitarpeet ovat suuret. Toisaalta osa teknologioista, kuten PtX- ja vetytelkistykseen perustuva teräksentuotanto, ovat vasta demonstraatioasteella ja teknologia kaupallistumiseen riittävän nopeasti liittyy epävarmuutta. Jatkuva kasvu -skenaariossa oletettiin erityisesti panostettavan digitalisaatioon ja älykkäisiin järjestelmiin, joten sähköistyminen oli vahvaa kaikilla sektoreilla, mutta erityisesti liikenteessä ja teollisuudessa. Vuoden 2040 tienoilla oletettiin jopa pienten modulaaristen ydinreaktoreiden kaupallistuvan, joilla erityisesti korvattaisiin fossiilista lämmöntuotantoa suurissa kaupungeissa.

Sekä Jatkuva kasvu - että Säästö -skenaariossa oletettiin myös merkittäviä toimia ja rakenteellisia muutoksia maataloussektorilla. Maataloudessa kustannusvaikuttavimmat toimenpiteet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ovat suurella todennäköisyydellä turvemaiilla toteutettavia toimia. Koska hehtaariohtainen päästövähennys on turvemaiilla iso, jopa 10–30 tonnia CO₂-ekv. vuodessa, on helppo osoittaa edulliset päästövähennykset mahdollisiksi turvemaiilla. Näin on etenkin tapauksissa, joissa kaikkea peltoa ei välttämättä tarvita maatalouskäytössä ja joissa metsittäminen tai kosteikon perustaminen onnistuu kohtuullisella vaivalla ja kustannuksilla. Turvemaiden päästöjä voidaan alentaa myös kasvipeitteisyyttä lisäämällä, muokkausta vähentämällä ja pohjaveden pintaa nostamalla (ks. lisätietoja menetelmästä <https://www.luke.fi/sompa/hyvia-esimerkkeja/>). Näistä keinoista suosituimpia ja helpoimpia toteuttaa, mutta samalla vähiten tehokkaita, ovat kasvipeitteisyyden lisääminen ja muokkauksen vähentäminen sekä nurmiviljelyn lisääminen yksivuotisten kasvien sijaan.

Turvemaiden metsitys tai perustaminen kosteikoiksi tuottavat isot päästövähennykset hehtaaria kohden. Tämä voi onnistua kohtuullisin kustannuksin yksittäisillä peltolohkoilla tai ryhmässä peltolohkoja yhdellä tai useammalla maatilalla. Peltojen viljelykäytöstä luopumista tarkoittavat toimet ovat kuitenkin vaikeita ja kalliita toteuttaa maataloilla, jotka tarvitsevat kaiken pellon maataloustuotantoon esim. tapauksissa, joissa on investoitu voimakkaasti korkean tuottavuuden kotieläintuotantoon. Nämä tilat ovat tärkeitä ruokaturvan kannalta. Osalla maataloista on kuitenkin mahdollisuuksia osoittaa heikottuottoisia turvepeltoja päästövähennystoimiin.

Peltolohkojen vaihdon sujuvoittaminen (tukiehtojen määrittely ym.) maatalojen kesken pitkäaikaisin vuokrasopimuksin tai muuten määräajaksi voi sekä tehdä mahdolliseksi päästövähennykset turvemaiilla samalla kun intensiivinen maataloustuotanto ohjautuisi enemmän kivennäismaille, joilla kasvihuonekaasupäästöt ovat selvästi alhaisempia turvemaihin verrattuna.

Koska turvemaiilla voidaan päästä alempiin päästövähennyskustannuksiin kuin monilla muilla sektoreilla yhteiskunnassa (esim. päästöoikeuden hinta päästökaupasektorilla on noin 20 eur/tonni CO₂-ekv. vuonna 2019), päästövähennysten tuottaminen turvemaiilla tulisi nähdä mahdollisuutena viljelijöille. Päästövähennyksistä palkitseminen kannustinjärjestelmien ei ole kuitenkaan aivan helppo toteuttaa. Se edellyttää reiluihin koettuihin pelisääntöihin, turvemaan ja sen paksuuden täsmällistä määrittelyä (pitkäaikaiset toimet tarkoituksenmukaista kohdentaa vain paksu- turpeisille turvemaiille), tehtyjen toimien todentamista, neuvontaa ja ennen kaikkea resursseja. Viljelijöiltä saatujen kokemusten mukaan on myös tärkeää, että kannustimet päästövähennysten tuottamiseksi eivät heikennä kannustimia ruuantuotantoon, vaan viljelijöiltä tulisi edellyttää markkinakelpoisten maataloustuotteiden tuottamista eikä pelkkää peltojen viljelykunnossa pitämistä maataloustukien saamiseksi. Asteittain aleneva tuki (esim. aleneva kansallinen tukiosuus) pitkäaikaisille viljelemättömille peltolohkoille voisi olla tällainen kannustin.

Toistaiseksi peltoalalle maksettavien maataloustukien menettämisen mahdollisuus pitää likimain kaiken peltoalan tukijärjestelmän edellyttämässä viljelykunnossa. Tämä jarruttaa myös päästövähennysten tuottamista turvemaiilla metsityksen ja kosteikkojen tapauksissa, koska maataloustukia ei voida maksaa metsityk-

alalle, eikä niille kosteikkokasveille, jotka eivät ole ennestään tukien piirissä. Tämän asetelman muuttamiseksi tarvitaan uudenlaisia kannustimia päästövähennysten tuottamiseen, sekä osin nykyisten tukiehtojen uudelleenarviointia. Yksi mahdollisuus olisi määritellä maataloustukijärjestelmästä riippumaton tuki tai palkkio kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Huonotuottoisten tai vesitaloudeltaan huonojen peltojen metsittäminen tai muuttaminen kosteikoiksi tuottaisi merkittäviä päästövähennyksiä hehtaaria kohden, joista viljelijöitä palkittaisiin. Esimerkiksi metsityksestä voitaisiin maksaa tuntuva kertakorvaus, mikä kompensoisi maataloustukikelpoisuuden menetystä. Palkkio voisi tulla myös yksityisiltä hiilikompensaatiomarkkinoilta. Tällöin päästövähennyspalkkioihin kuluvat varat eivät olisi pois muista sinällään perustelluista maataloustuista (tätä tilannetta viljelijät eivät toivo). Pitäisi kuitenkin pystyä välttämään tilanne, jossa toisaalla metsitetään ja toisaalla raivataan uusia peltoja. Näin etenkin, jos alueella on ennestään peltoja vajaakäytössä. Kaikelle metsänhävitykselle on jo ehdotettu maankäytön muutokseen kohdistuvaa maksua, minkä ansiosta metsityspalkkio ei yhtä helposti johtaisi samanaikaisesti metsitykseen ja pellonraivaukseen (Kärkkäinen et al. 2019).

Maatalouden biokaasutuotannon laajamittainen lisääminen, joka johtaisi edellä esitettyjen skenaarioiden mukaisesti maatalouden energia-omavaraisuuden kasvuun ja energiakustannusten vähenemiseen, edellyttäisi mittavia julkisia resursseja biokaasulaitosten investointitukiiin, jotka nykyisin noin 40 prosentin tasolla hyväksyttävistä kustannuksista. Edellytyksenä laajamittaiselle biokaasutuotannon lisäämiselle on muuttuvien kustannusten osalta kannattava biokaasun, ravinteiden kierrätyksen ja kotieläintilojen toiminnan kokonaisuus. Tällöin investoidulle pääomalle saadaan tarvittava tuotto koko investointipääoman takaisin maksamiseksi kohtuujassa (alle 10 vuotta). Biokaasutuotannon ja ravinnekierrätyksen kokonaisuutta ja mahdollisuuksia ovat arvioineet mm. Tampio et al.(2019) ja Luostarinen et al. (2019).

Maatalouden tuottavuuden kehittäminen sekä kasvin- että kotieläintalouden osalta johtaisi kasvihuonekaasupäästöjen vähenemiseen tuotettua yksikköä kohti. Tähän suuntaan vaikuttavat kasvin- ja kotieläinjalostuksen ohjelmat sekä tuotantoteknologian ja mautilojen johtamisen kehittäminen. Tutkimus ja neuvonta ovat tärkeitä, jotta maatalouden toiminta suuntautuu enemmän ilmastoviisaaseen suuntaan.

Elintarvikkeiden kulutuksen ohjaaminen kasvispainotteiseen suuntaan esim. veroin ja/tai verohelpotuksin voi myötävaikuttaa siihen, että kotimaista kulutusta vastaava tuotanto voidaan tuottaa selvästi aiempaa pienemmällä peltoalalla, kuten edellä esitetyt skenaariot osoittavat. Tarvittavan muutoksen aikaansaaminen kuluttajakäyttäytymisessä tuskin kuitenkaan toteutuu yksin veroilla tai verohelpotuksilla (joiden tulisi olla suuruudeltaan varsin merkittäviä, jolloin ne voivat aiheuttaa ongelmia alimpien tuloluokkien kotitalouksille), eikä niiden käyttö takaa sitä, että ravitsemus muuttuisi automaattisesti terveellisempään suuntaan. Ruokavaliomuutos vaatii suurella todennäköisyydellä ennen muuta pitkäjänteistä tiedollista ohjausta ja kasvispainotteisemman ruokakulttuurin johdonmukaista edistämistä joukkoruokailussa.

Maankäyttöä ohjataan kaavoituksella, jolloin se on luonteva väline vaikuttaa ratkaisuihin myös ilmastonäkökulmasta. Rakentamista voidaan ohjata alueille, joilla

muutoksesta on vähäisemmät vaikutukset päästöihin. Kysymys ei ole pelkästään siitä, rakennetaanko uusi asuinalue metsään vai pellolle, mutta myös kuinka tiheään rakennetaan, ja millaisia rakennuksia (esim. omakotialue vs. kerrostaloalue). Lisäksi niin metsäalueen rakentamista kuin metsän raivausta pelloksi voidaan hillitä kielloilla tai maksuilla. Vaikka esitetyissä skenaariossa metsityksellä ei saavutettu merkittävää nielun lisäystä, on se pitkällä aikavälillä ilmastonkannalta myönteistä toimintaa.

LULUCF-sektorilla sekä skenaarioiden laadinnassa että päästöjen laskennassa on useita tunnistettuja kehittämistarpeita. Tulevaisuuden maankäyttöä ja maankäytön muutoksia arvioidaan nyt pitkälti historiatiedon valossa, joskin tässä raportissa esitettyihin skenaarioihin on jo jossakin määrin sisällytetty myös muilta sektoreilta kuin maataloudesta tulevia maankäyttöön vaikuttavia oletuksia. Maankäyttöä tulisi tarkastella alueellisesti niin, että skenaariot eivät jäisi teoreettisiksi laskelmiksi ilman alueellisten erikoispiirteiden huomioon ottamista.

11. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tiina Koljonen (VTT), Jyrki Aakkula (Luke), Juha Honkatukia (Merit Economics), Sampo Soimakallio (Syke), Heikki Lehtonen (Luke), Tarja Tuomainen (Luke)

Tässä raportissa on esitetty syksyllä 2019 käynnistettyjen PITKO-jatkohankkeen ja MALUSEPO-hankkeen keskeiset tulokset ja skenaariolaskelmien lähtökohdat siltä osin, kun ne ovat muuttuneet verrattuna helmikuussa 2019 valmistuneisiin VN-TEAS-raportteihin (Koljonen et al. 2019a, Aakkula et al. 2019). PITKO-jatko-hankkeen toteuttivat VTT, Syke ja Merit Economics ja MALUSEPO-hankkeen toteutuksesta vastasi Luke. Raportissa esitettyjen laskennallisten ja laadullisten analyysien lähtökohdista on päivitetty siten, että ne ovat linjassa nykyisen hallitusohjelman (VN 2019) kanssa. Laskemien kannalta keskeisin lähtökohdista oli hallitusohjelman hiilineutraalisuustavoite vuodelle 2035. Hankkeissa laadittiin kaksi erilaista polkua, jotka tämän hallitusohjelman tavoitteen toteuttaisivat. Hankkeet ovat ensisijaisesti tuottaneet taustatietoa alkuvuodesta 2020 Euroopan komissiolle lähetettävän pitkän aikavälin strategiaan (LTS), joka on osa EU:n hallintomalliasetuksen toimeenpanoa. Lisäksi tuloksia hyödynnetään taustatietona tulevien kansallisten energia- ja ilmastopolitiikkatoimien laadinnassa.

Aiemmassa PITKO-hankkeessa laadittiin neljä vaihtoehtoista vähäpäästöskenaariota, joiden määrittelyt perustuivat laajan asiantuntijajoukon kuulemiseen ja yhteistyöhön. Lisäksi laadittiin WEM (With Existing Measures) -skenaario, joka noudatti myös energia- ja ilmastostrategialle 2016 sekä keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmalle (KAISU) laadittua vertailuskenaarioita. PITKO-hankkeen keskeinen johtopäätös oli, että Suomi voi saavuttaa hiilineutraalisuustavoitteen vuoden 2040 tienoilla, joten oli selvää, että vähäpäästöskenaarioiden lähtöoletuksia tuli päivittää siten, että vuoden 2035 hiilineutraalisuustavoite saavutettaisiin. PITKO-jatko- ja MALUSEPO-hankkeissa päädyttiin WEM, Jatkuva kasvu ja Säästö -skenaarioiden päivittämiseen siten, että laskelmissa on myös hyödynnetty uusinta tilastollista ja muuta tietoa. Esimerkiksi LULUCF-sektorin metsänielujen laskennassa Luke on käyttänyt tuoreempaa valtakunnan metsien inventointitietoa (VMI11/12), joka on vuosilta 2013–2017, kun taas MALULU:ssa käytetty inventointitieto oli peräisin vuosilta 2009–2013.

Tässä raportissa termillä hiilineutraalius viitataan kasvihuonekaasuneutraaliuuden tyypillisen käytännön mukaisesti, jossa ihmisperäiset kasvihuonekaasupäästöt ja ihmistoimin aikaansaadut nielut ovat tasapainossa. Hankkeiden ohjausryhmän päätöksellä lisäksi sovittiin, että hiilineutraaliustarkasteluissa tässä raportissa lähtökohdista on Suomen alueellisten kasvihuonekaasujen päästöjen ja nieluilla aikaansaatu poistumien tasapaino. Nieluihin lasketaan mukaan kaikki maankäyttösektorilla (LULUCF) raportoitavat metsien, maaperän ja puutuotteiden poistumat ja teknisillä keinoin, esimerkiksi bioenergiaan kytketyn hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin avulla aikaansaadut poistumat (I. BECCS).

Vuoden 2050 tavoitteena tarkasteltiin 87,5 %:n (Jatkuva kasvu) ja 90 %:n (Säästö) päästövähennyksiä (pl. maankäyttösektori) vuoden 1990 tasoon verrattuna, kuten PITKO-hankkeessa. Vuoden 2035 jälkeiselle hiilinegatiivisuudelle ei siten asetettu määrällistä tavoitetta, vaan sen suuruuden annettiin määräytyä maankäyttösektorin nettonielun tasosta riippuen.

Maatalous

Maataloussektorin tulokset osoittavat, että vallitsevan maatalouspolitiikan jatkaminen ei vähentäisi maatalouden KHK-päästöjä, vaan ne olisivat edelleen suurin piirtein nykyistä vastaavalla (6,30 milj. t CO₂-ekv. vuonna 2018) tai jopa hiukan korkeammalla tasolla vuonna 2050 (6,45 milj. t CO₂-ekv.), mikäli maailmanmarkkinoiden hintakehitys ja tuottavuuden kasvu johtaisi kotieläintuotannon kasvuun ja samalla pellonraivaus turvemailloin jatkuisi, vaikkakin vähäisenä. Todennäköisimmältä näyttää kuitenkin se, että nykypolitiikalla maataloussektorin KHK-päästöt pysyvät ennallaan.

Maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöjä, jotka ovat pääasiassa suoraan kotieläimistä ja peltojen viljelystä aiheutuvia päästöjä, on vaikea vähentää kotieläintuotantoa vähentämättä. Turvemailloin, joista kaikkia ei tarvita viljelyksessä, voidaan kuitenkin saavuttaa jo nykytilanteessa päästövähennyksiä, jotka lasketaan pääosin LULUCF-sektorilla. Jo aiempi MALULU-hankkeen raportti (Aakkula et al. 2019) osoitti, että maatalous voi kotieläintaloutta vähentämättä myötävaikuttaa päästövähennyksiin sekä maatalous- että etenkin LULUCF-sektoreilla. Tämä kuitenkin edellyttäisi, että turvepelloille perustettaisiin kosteikoita kymmenien tuhansien hehtaarien alueelle ja että osa turvepelloista säätösaloitettaisiin tai metsitettäisiin. Päästövähennykset jäisivät tällöin 10–15 prosenttiin maataloussektorin päästöistä vuoteen 2050.

Keskeisin johtopäätös maatalouden osalta onkin, että suuria vähennyksiä KHK-päästöissä ei ole mahdollista saavuttaa, mikäli ei oleteta huomattavia muutoksia tuotannon määrään ja pellon käyttöön. Koska suurimmat KHK-päästöt aiheutuvat erityisesti maidon- ja lihan tuotannosta sekä turvepeltojen viljelystä, niin toimenpiteiden kohdistaminen niihin vähentää KHK-päästöjä kaikkein tehokkaimmin. Edullisimmat päästövähennykset saadaan todennäköisesti turvemailloin, etenkin jos kotieläintalous vähenee tai suuntautuu turvemailloin kivennäismailloin. Viljelijöillä ei toisistaan ole tähän kannustimia.

Vähentämispotentiaaliltaan suurimmassa Jatkuva kasvu -skenaariossa maito- ja lihatuotteiden kulutuksen oletettiin vähenevän puoleen nykytasosta vuoteen 2050 mennessä. Tämän seurauksena maidontuotanto vähenisi tulosten mukaan 30 % ja lihan tuotanto noin 50 %. Vaikka samalla erityisesti valkuaiskasvien tuotannon pinta-alan oletettiin lisääntyvän moninkertaiseksi, niin siitä huolimatta maatalouden pelto-pinta-ala väheni noin kolmasosalla. Kun lisäksi samalla oletettiin, että lähes 80 % turvepeltoalasta poistuisi maataloustuotannosta, niin maataloussektorin KHK-päästöt vähenivät nykytilanteesta 25 % vuoteen 2035 mennessä ja 41 % vuoteen 2050 mennessä.

Säästö-skenaariossa, jossa oletukset olivat samansuuntaisia, mutta lievempiä eli 30 % vähennys maidon- ja lihan kulutuksessa (maidontuotannossa vähennys 20 % ja lihantuotannossa 30 %) sekä 60 % turvepeltoalan poistuma vuoteen 2050, KHK-päästöjen vähennys nykytilanteesta jäi jonkin verran pienemmäksi eli 19 prosenttiin vuoteen 2035 mennessä ja 33 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä.

Turvepeltojen viljelyksestä poistamisen merkitys korostuu vielä entisestään, kun huomioon otetaan myös LULUCF-sektorille kohdistuvat maatalousmaan KHK-päästövähennykset. Kun ne lasketaan yhteen maataloussektorin KHK-päästövähennysten kanssa, niin tällöin Jatkuva kasvu -skenaariossa on mahdollista saavuttaa 52 % KHK-päästöjen vähennys ja Säästö-skenaariossa 43 % KHK-päästöjen vähennys nykytasosta vuoteen 2050 mennessä.

Maataloussektorin skenaariot siis osoittavat, että jos kotieläintuotteiden kulutus laskee, nopein ja tehokkain tapa KHK-päästöjen alentamiseen ovat kotieläintuotannon vähentäminen ja turvemaiden siirtäminen pois viljelyksestä. Siksi olisikin perusteltua kehittää vapaaehtoisuuteen ja erilaisiin kannustimiin perustuvia ohjaustoimenpiteitä, joilla maataloustuotantoa siirrettäisiin turvepeltoilta kivennäismaille ja viljelyksessä olevia turvepeltoja poistettaisiin pysyvästi maatalouskäytöstä metsittämällä tai kosteikoiksi. Tämä edellyttää kuitenkin huolellista tarkastelua, sillä tietyillä alueilla (esim. Pohjois-Pohjanmaa) ja monilla yksittäisillä maatiloilla maatalouden harjoittaminen nojaa hyvin vahvasti turvepeltojen hyödyntämiseen.

LULUCF-sektori

LULUCF-sektori tuotti kaikissa kolmessa laaditussa skenaariossa nettonielun, eli kasvihuonekaasujen poistumat olivat päästöjä suuremmat. Skenaariot kuitenkin osoittavat, että metsiin kohdistuvilla toimenpiteillä on sektorin taseeseen selvästi muita maankäyttömuotoja suurempi merkitys. Hakkuumäärissä tapahtuvat muutokset eivät vaikuttavat metsien hiilitaseeseen vain poistetun puustobiomassan kautta, vaan samalla myös maaperän hakkuiden seurauksena muuttuvan karikesyötteen kautta. Puun lisätty käyttö pitkäikäisten tuotteiden valmistukseen ei korvaa metsänielun pienentymistä. Skenaarioissa puutuotteiden vaikutusta tarkasteltiin KHK-inventaarion menetelmällä, jolloin puun käyttöön raaka-aineena muissa prosesseissa nykyisistä tuoteryhmistä poikkeavissa tuotteissa ei ole otettu huomioon.

Kaikissa kolmessa skenaariossa saavutettiin 80 miljoonan m³ vuotuinen hakkuukertymän taso jaksolla 2025–2034. Säästö-skenaariossa nielu kuitenkin jäi 7–9 Mt CO₂-ekv. pienemmäksi kuin WEM ja Jatkuva kasvu -skenaarioissa. Tämä johtui siitä, että Säästö-skenaariossa hakkuukertymätaso oli muita skenaarioita selvästi suurempi. Käännepointe sijoittui vuodelle 2030, jolloin nielu kääntyi kasvuun kaikissa skenaarioissa. Etenkin Jatkuva kasvu -skenaariossa nielu kehittyi nopeaan tahtiin yltäen 42 miljoonaan tonniin CO₂-ekv. vuonna 2050. Muissa maankäyttöluokissa vähentyneet päästöt pitivät koko sektorin nettonielun 40 miljoonassa tonnissa CO₂-ekv. Säästö-skenaario poikkesi muista, koska siinä metsien nielu oli pienempi kuin koko LULUCF-sektorin yhteenlaskettu nielu. Tämä oli seurausta maatalousmaidon

ja kosteikkojen vähentyneistä päästöistä, mutta ennen kaikkea puutuotteiden lisääntyvästä nielusta.

Turvemaiden jättäminen pois viljelystä tuottaa merkittäviä päästövähennyksiä. Päästöjä saadaan näin laskennallisesti vähennettyä jopa 40 %, mutta käytännössä nopeiden päästövähennysten saavuttaminen on maataloudessa haasteellista, kuten aikaisemmin on jo todettu. Viljelystä vapautuvan alueen jatkokäytöllä on merkitystä LULUCF-sektorin kokonaispäästötilanteeseen. Sama koskee turvetuotannosta vapautuvia alueita. Metsitys on ilmeinen jatkokäyttömuoto, jolloin puusto (sekä pintakasvillisuus) ja siitä maahan kohdistuva karikesyöte vähitellen kerryttävät maaperän hiilivarastoa. Puita nopeammin kasvavat lajit ennen puiden istutusta tai samanaikaisesti puiden kanssa kasvatettuna voisivat tuottaa nopeammin tulosta. Myös muiden ei-perinteisten maatalouskasvien kasvatus turvemailla saattaisi tulla kysymykseen.

Metsien kehityksen ennustaminen MALUSEPO-skenaarioissa perustuu metsäteollisuuden ennakoituun puunkäyttöön ja laadittuihin kausittaisiin hakkuukertymätavoitteisiin sekä näiden oletusten pohjalta MELA-ohjelmistolla tehtyyn laskentaan. Skenaarioissa valittu hakkuiden taso vaikuttaa puuston kasvuun ja kokonaistilavuuden kehitykseen, ja tätä kautta puustoon sitoutuneen hiilen määrään. Metsien käsittelyt on laskennassa oletettu toteutettavaksi nykyisten metsänhoitosuositusten mukaisesti, mutta esim. metsän lannoitusta ei ole laskennassa huomioitu. Metsien hiilinieluja voitaisiinkin lisätä tulevaisuudessa mm. metsien lannoituksella, uuden jalostetun siemenmateriaalin käytöllä ja laajemmin metsänkasvatusmenetelmien kehittämisellä. Aktiivista metsien hoitoa voidaan tukea parhaiten erilaisilla rahallisilla kannustimilla ja verotusratkaisuilla.

Tulevaisuudessa päästöjen ja nielujen laskenta tulee nykyistä kattavammaksi. MALUSEPO:n skenaariot eivät sisällä mm. rakennettujen vesialueiden kuten tekojärvien päästöjä, joiden laskentaan IPCC on tänä vuonna antanut ohjeet. Etenkin turvemaiden laskennassa on edelleen suuret epävarmuudet, ja parhaillaan kehitetään menetelmiä, jotka nykyistä paremmin ottavat huomioon sekä metsissä tapahtuvat että maataloudessa tehtävät muutokset. Koko sektorin kattava laskenta tarkoittaa myös kaikkien rakennettujen alueiden päästöjen ja poistumien sisällyttämistä niin KHK-inventaarioon kuin myös skenaarioihin.

Vaikutukset kasvihuonekaasupäästöjen ja energiajärjestelmän kehitykseen

Tulosten mukaan päästöjen kokonaismäärä on vuonna 2020 WEM-skenaariossa vajaat 55 Mt, eli 23 % vähemmän kuin vertailuvuonna 1990. Vähäpäästöskenaarioiden päästöurat alkavat erkaantua WEM-skenaariosta selvästi jo 2020-luvulla siten, että Jatkuva kasvu -skenaariossa kokonaispäästöjen vähennys on vuonna 2030 noin 50 % ja Säästö-skenaariossa noin 47 % vuoden 1990 tasosta. Vuoden 2035 tiukan hiilineutraalisuustavoitteen vuoksi taakanjakosektorin päästöt vähenevät Jatkuvan kasvun skenaariossa vuonna 2030 noin 14% alle EU:n asettaman taakanjakosektorin tavoitteen ja Säästö-skenaariossa noin 6% alle EU:n asettaman tavoit-

teen. Suomi ylittää siten kummassakin vuoden 2035 hiilineutraalisuuteen tähtäävissä vertailupoluissa sekä EU:n yhteisen vuotta 2030 koskevan tavoitteen, eli 40 %:n päästönvähennyksen vuoden 1990 päästöihin verrattuna, että Suomelle asetetun taakanjakosektorin päästötavoitteen (39 % vuoden 2005 tasoon verrattuna). Päästöt vähenevät myös WEM-skenaariossa vuoden 2030 jälkeen verrattain tasaisesti noin 27 miljoonan tonnin tasolle vuoteen 2050 mennessä, mikä vastaa jo varsin tuntuvaan, 63 %:n vähennystä. Päästövähennys on seurausta oletetusta päästöoikeuden hintaurasta, jossa päästöoikeuden hinta nousee vuoteen 2050 mennessä noin 90 €/t CO₂-tasolle.

Jatkuva kasvu -skenaariossa vuodelle 2050 asetettu 87,5 %:n päästöjen vähentämisen vähimmäistavoite saavutetaan kotimaisin toimin ilman hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS), skenaarion lähtöoletusten mukaisesti. Säästö-skenaariossa tavoitteet sekä hiilineutraalisuudesta vuonna 2035 että 90 %:n päästönvähennyksestä vuonna 2050 saavutetaan sen sijaan huomattavalta osin bio-CCS:n tuottamien huomattavien negatiivisten päästöjen avulla. CCS:n puuttuminen keinovalikoimasta johtaa Jatkuva kasvu -skenaariossa erittäin tiukkoihin päästönvähennystoimiin kaikilla sektoreilla, mukaan lukien maatalous ja teollisuusprosessit, joissa päästöjen voimakas vähentäminen on teknis-taloudellisten arvioiden mukaan vaikeinta. Säästö-skenaariossa CCS-tekniikan käyttö bioenergiaan puolestaan johtaa negatiivisiin polttoaineiden polton päästöihin vuonna 2050, jolloin erityisesti maatalouden päästöihin voidaan kohdistaa lievempiä toimia. Säästö-skenaariossa CCS:n kaupallistuminen ja investoinnit BECCS:än Suomessa johtavat päästöjen vähentämiseen yli 90 %:n vähimmäistavoitteen. TIMES-VTT laskelmien mukaan Suomen KHK-päästövähennys olisi vuonna 2050 jopa 100 %, kun oletettu päästökauppa (i. negatiivisten KHK-päästöjen sisällytys EU:n päästökauppajärjestelmään ja negatiivisten päästöjen huomioiminen täysimääräisesti päästöoikeuden hinnassa) tekevät negatiivisten "päästöjen tuottamisen" kannattavaksi.

Primaarienergian kokonaiskulutus on WEM-skenaariossa korkeimmillaan noin 1570 PJ (436 TWh) vuosina 2030–2035, jonka jälkeen kulutus alkaa pienentyä. Uudet skenaariolaskelmat osoittavat, että vuoden 2035 tiukka hiilineutraalisuustavoite vaikuttaa selvästi vuoden 2030 jälkeiseen energiankulutukseen. Fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee kaikissa skenaarioissa merkittävästi jo vuoteen 2030 mennessä, sillä jo WEM-skenaariossa oletetut päästöoikeuksien nousevat hinnat ja uusiutuvan energiatekniikan kehitys heikentävät fossiilisten polttoaineiden kilpailukykyä. Vähäpäästöskenaarioissa erityisesti mineraaliöljyn ja kivihien kokonaiskulutus vähenevät WEM-skenaariota voimakkaammin jo vuoteen 2030 mennessä, mutta maakaasu säilyttää tällöin vielä asemansa verrattain hyvin ole-massa olevan infrastruktuurin ja tuotantokapasiteetin ansiosta. Vuosina 2020–2030 käyttöön tulevat yksi tai kaksi uutta ydinvoimalaitosta vaikuttavat lauhdevoimalaitoksina kumpikin tuntuvasti primaarienergiataseen rakenteeseen ja määrään, ja samoin vaikuttavat Loviisan ja Olkiluodon vanhojen laitosten käyttöiän pidennykset. Uusiutuvan energian kokonaismäärä nousee vuoteen 2030 mennessä 50–64 % vuoden 2010 tasosta ja vuoteen 2050 mennessä vastaava lisäys on 100–110 %.

Kansantalous

Tämän tutkimuksen skenaarioiden tavoite on kuvata kansantalouden kehitystä erilaisten teknologisten valintojen ja kehityspolkujen ja päästötavoitteiden valossa. Skenaarioiden erot syntyvät teknologian ja tuotannon eroista energiantuotannossa, teollisuudessa ja liikenteessä. Muun talouden osalta erot jäävät lopulta suhteellisen pieniksi. Vaikka skenaarioissa siis tehdään hyvinkin erilaisia valintoja teknologian ja päästöjen rajoittamisen osalta, valinnat välittyvät avaintoimialoilta muuhun talouteen maltillisesti. Teknologinen kehitys – kokonaistuottavuuden kasvu – on tulevaisuudessakin keskeisellä sijalla. Uuden teknologian käyttöönotto vaatii kuitenkin ennistä suurempia investointeja.

On ehkä syytä korostaa, että taloudellinen hyvinvointi kasvaa, vaikka yhteiskunta muuttuu vähähiiliseksi tai hiilineutraaliksi. Kulutuksen kasvun kautta tarkasteltuna skenaarioiden teknologiasta kumpuavat erot käyvät myös selvemmiksi – uuden teknologian käyttöönotto kun suuntautuu ja ajoittuu skenaarioissa varsin eri tavoin. On selvää, että hiilineutraalisuuden varhainen tavoittelu aiheuttaa lisäkustannuksia aiempaan päästöjen rajoittamisen aikatauluun verrattuna. Tämä ei kuitenkaan arviomme mukaan vaaranna kotitalouksien hyvinvointia eikä julkisen sektorin rahoitusasemaa ja hyvinvointipalvelujen tuottamista, joskaan tutkimuksessamme ei ole ollut mahdollista arvioida kattavasti tavoitteen kaikkia saavuttamisen vaatimia politiikka-toimenpiteitä esimerkiksi taloudellisen ohjauksen osalta.

Talouden rakenteeseen hiilineutraalisuuden tavoittelulla on vaikutuksensa. Uuden teknologian myötä kone- ja laitteellisuuden merkitys korostuu, mutta se tapahtuu osittain palvelujen – lähinnä kaupan ja majoituksen – kustannuksella. Alkutuotannon osuutta kasvattaa kotimaisen raaka-ainepohjan hyödyntäminen. Teollisuuden osuuden kasvua hillitsee se, että kotimaisen kustannustason nousu heikentää viennin hintakilpailukykyä, jos muut maat eivät Suomen tavoin omaksu aikaista hiilineutraalisuustavoitetta.

Kokonaispäästökehitys, riskit ja ohjaustoimet

Laskelmien mukaan nykyisillä toimilla hiilineutraalisuutta ei saavuteta ennen vuotta 2050 ja silloinkin ainoastaan, jos maankäytön nettonielut ovat noin 30 Mt CO₂ ekv.-tasolla. Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaarioissa hiilineutraalisuus sen sijaan saavutetaan vuonna 2035, mutta se edellyttää merkittävää KHK-päästöjen vähentämistä erityisesti jaksolla 2030–2035 sekä lisäksi sitä, että metsien hiilinielut kehittyisivät kuvien 21 ja 22 mukaisesti. Tarkastelluista vähäpäästöskenaarioista kansallisten ohjauskeinojen tarpeen voidaan odottaa olevan Säästö-skenaariossa merkittävästi suurempi kuin Jatkuva kasvu -skenaariossa, sillä edellisessä tarvittavat vuotuiset päästönvähennykset nousevat vuosina 2033–2035 yli 20 %:n, kun jälkimmäisessä se pysyy koko ajan 10 %:n tason alapuolella. Toisaalta Jatkuva kasvu -skenaariossa päästöjen vähentämisen rajakustannukset nousevat korkeaksi ja lisäksi

vaaditaan merkittäviä T&K-panoksia uuden teknologian nopeutettuun käyttöön ottoon, mikä viittaa myös ohjaustoimien tarpeeseen, jotta kustannukset jakaantuvat tasaisesti eri päästösektoreille ja toimialoille.

Hiilineutraalisuustavoite vuonna 2035 voidaan saavuttaa useita eri polkuja pitkin. Tässä työssä päästövähennysurien eroavuudet selittyvät skenaarioiden taustalla olevista teknologiaoletuksista sekä toisaalta oletuksista liittyen teolliseen, yhdyskunta- ja koko talouden rakenteeseen. Kuten edellä esitettiin, teknologiaoletuksista ehkä keskeisin liittyy mahdollisuuksiin hyödyntää hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS), mukaan lukien BECCS. Lisäksi lähtöoletukset liittyen metsäteollisuuden kehitykseen Suomessa vaikuttavat keskeisesti maankäytön nettonielujen kehitykseen ja sitä myöden myös tarvittavaan KHK-päästövähennysmäärään, jotta hiilineutraalisuus saavutettaisiin. Säästö- skenaariossa oletettiin, että metsäteollisuus kehittyä ja laajenee, jonka vuoksi myös kotimaisen puuraaka-aineen kysyntä kasvaa. Toisaalta tässä tulee huomata, että laskelmissa lähtökohtaisesti oletettiin, että raakapuunhankinta on pääosin kotimaista ja tuontipuun suhteellinen määrä oli asetettu maksimissaan 14,5 %:in ainespuun kokonaiskysynnästä. Toinen huomioitava asia on, että oletuksia metsäteollisuuden kehityksestä ja kotimaisen puun kysynnästä ei mitenkään optimoitu kotimaisen puun tarjonnan näkökulmasta, ja lisäselvitysten tarve on ilmeinen.

Metsien hiilinieluihin liittyvä epävarmuus vaikuttaa oleellisesti asetetun hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseen. Mallien oletukset ja käytetyt parametrit vaikuttavat merkittävästi lopputuloksiin etenkin pitkällä aikavälillä metsien kasvun dynaamisen luonteen vuoksi. Lisäksi laskentamenetelmät kehittyvät jatkuvasti, ja uusi tutkimustieto saattaa muuttaa tuloksia merkittävästikin.

Vähäpäästöskenaarioiden toteutumiseen liittyy erilaisia ja eritasoisia riskitekijöitä jokaisen päästösektorin ja yksittäisen päästövähennyskeinon suhteen. Kulutus- ja tuotantovolyymin ja -rakenteiden kehitykseen vaikuttaa moni tekijä kuten ihmisten arvojen, asenteiden ja käyttäytymisen kehittyminen, teknologinen kehitys ja poliittiset päätökset. Merkittävä riski skenaarioiden päästötasojen saavuttamiseksi voi realisoitua silloin, jos usea eri päästöjen vähentämistä hidastava tai estävä riski realisoituu samanaikaisesti. Lopulta paljon riippuu siitä, saadaanko tavoitellun muutoksen toteuttamiseksi tarvittavat ohjauskeinot laadittua.

Kotimaisilla ohjaustoimilla voidaan edistää kestävää siirtymistä hiilineutraaliin yhteiskuntaan. Kuten hallitusohjelmaan on kirjattu, siirtymän tulee olla oikeudenmukainen kaikille eikä siten aiheuttaa toisille toimialoille tai sosiaalisille ryhmille suurempaa taakkaa kuin toisille. Tässä hankkeessa ei lainkaan tarkasteltu siirtymää alueellisen saati sosiaalisen oikeudenmukaisuuden näkökulmasta, vaan laskemien lähtökohtana oli päästövähennyskustannusten minimointi koko maan tasolla, joten skenaariot eivät edusta tästä näkökulmasta realistista polkua. Tarvitaan syvällisempää sekä laaja-alaisempaa tutkimusta, jossa huomioitaisiin alueelliset, taloudelliset ja sosiaaliset haasteet ja mahdollisuudet sekä eri toimialoihin, kuten maatalouteen ja teollisuuteen liittyvät erityispiirteet. Keskeistä lisäksi on, että toimiin ryhdytään mahdollisimman nopeasti, jotta investoinnit koko infrastruktuuriin uusiutumiseen ehtivät toteutua riittävän nopeasti.

Riskien hallinnan näkökulmasta aikaiset ja riittävät toimet ovat keskeisiä myös siitä syystä, ettei erityisesti vuoden 2050 tavoitteen riittävyttä ole systemaattisesti arvioitu. Tavoitteen riittävyys riippuu paitsi siitä, mitä voidaan pitää Suomelle oikeudenmukaisena tavoitteena, myös siitä, mikä osuus metsien hiilinielusta voidaan laskea ihmistoimin vahvistetuksi nieluksi. Vähäpäästöskenaarioissa oletettiin, että metsien hiilinielu voidaan laskea täysimääräisesti hyväksi tavoitetta täytettäessä. Mikäli metsien hiilinielua ei voida täysimääräisesti laskea ihmistoimin vahvistettavaksi nieluksi, ei vuodelle 2050 tarkasteltua tavoitetta voida luultavasti pitää riittävänä.

Lähdeviitteet

- Aakkula, J., Asikainen, A., Kohl, J., Lehtonen, A., Lehtonen, A., Ollila, P., Regina, K., Salminen, O., Sievänen, R. & Tarja Tuomainen. 2019. Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 20/2019. 70 p. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-650-8>
- DEA 2018. Data sheet for Electricity and district heat production. Aug 2016. (Update December 2018). Danish Energy Agency.
- EC 2016. European Commission. EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf
- EC 2019. European Commission. The European Green Deal. COM(2019) 640 final. Brussels.
- EU 2018. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2018/1999, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, energiaunionin ja ilmastotoimien hallinnosta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1999&from=EN>
- Finlex 2019. Suomen säädöskokoelma. Laki biopolttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä annetun lain muuttamisesta. 419/2019. Julkaistu Helsingissä 1 päivänä huhtikuuta 2019. <file:///C:/Users/protkk/Downloads/sk20190419.pdf>
- Fuglestad, J., Rogelj, J., Millar, R.J., Allen, M., Boucher, O., Cain, M., Forster, P.M., Kriegler, E. and Shindell, D., 2018. Implications of possible interpretations of 'greenhouse gas balance' in the Paris Agreement. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2119), p.20160445.
- Haakana, M., Ollila, P., Regina, K., Riihimäki, H. & Tuomainen, T. 2015. Menetelmä maankäytön kehityksen ennustamiseen: Pinta-alojen kehitys ja kasvihuonekaasupäästöt vuoteen 2040. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2015.
- Hamberg, L., Henttonen, H. & Tuomainen, T. 2016. Puusta valmistettujen tuotteiden hiilivaraston muutoksen laskenta kasvihuonekaasuinventaariossa – Menetelmäkehitys Suomen kasvihuonekaasuinventaarioon. Luonnonvara- ja

- biotalouden tutkimus 73/2016. Saatavissa: https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/537716/luke-luobio_73_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempinen, R. & Salminen, O. 2017. MELA2016 Reference Manual. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017. 547 p. ISBN 978-952-326-1 (Online).
- Honkatukia, J. 2009. Yleisen tasapainon mallien käyttö työllisyyden kehityksen ennakoinnissa ja talouspolitiikan vaikutusten analysoinnissa; Työpoliittinen Aikakauskirja 1/2009.
- Honkatukia, J. 2009. VATTAGE – yleisen tasapainon malli Suomen taloudesta; Kansantaloudellinen aikakauskirja 1/2009.
- Honkatukia, J. 2019. The FINAGE/REFINAGE General Equilibrium Models of the Finnish Economy. In Honkatukia, J., Lehtomaa, J., Ruuskanen, O.-P. and Alimoff, A.: (2019): ALTA Regional database. Prime Minister's Office, 2019.
- Honkatukia, J., Kohl, J. ja Lehtomaa, J. (2018). Uutta, vanhaa ja sinivalkoista – Suomi 2040. VTT Technology 327. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2018/T327.pdf>
- Hyvönen, P., Lempinen, R., Lappi, J., Laitila, J. & Packalen, T. 2019. Joining up optimisation of wood supply chains with forest management a case study of North Karelia in Finland. Forestry: An International Journal Of Forest Research: 15 p.
- IEA 2015. World Energy Statistics and Balances, International Energy Agency, 2015.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Saatavissa: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC. 2019. IPCC. Frequently asked questions. Q1-2-11.
- Kekkonen, H., Ojanen, H., Haakana, M., Latukka, A. & Regina, K. 2019. Mapping of cultivated organic soils for targeting greenhouse gas mitigation, Carbon

- Koistinen, A., Luiro, J-P. & Vanhatalo, K. (toim.). 2016. Metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen, työopas. Tapion julkaisuja. Saantitapa: https://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/06/MHS-Energiapuun-korjuun-suositukset_verkkojulkaisu2.pdf
- Koljonen, T., Flyktman, M., Lehtilä, A., Pahkala, K., Peltola, E & Savolainen, I. (2009) The role of CCS and renewables in tackling climate change. *Energy Procedia* 1:4323–4330.
- Koljonen, T. & Lehtilä, A. 2015 Modelling Pathways to a Low Carbon Economy for Finland. In: Giannakidis G et al (eds) *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy, vol. 30. Springer, Cham.
- Koljonen, T., Soimakallio, S., Lehtilä, A., Similä, L., Honkatukia, J., Hildén, M., Rehnunen, A., Saikku, L., Salo, M., Savolahti, M., Tuominen, P., Vainio, T. 2019a. Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019.
- Koljonen, T., Laukkanen, M., Ollikainen, M., Lehtilä A., Eerola, E., Koreneff, G. Kyritsis, E., Lindroos, T.J., Ollikka, K., Pursiheimo, E., Rämä, M., Siikavirta, H. 2019b. Energiantuotannon valmisteverotuksen kehittäminen Suomessa. VTT Technology 359. Espoo: VTT.
- Kärkkäinen, L., Haakana, M., Heikkinen, J., Helin, J., Hirvelä, H., Jauhiainen, L., Laturi, J., Lehtonen, H., Lintunen, J., Niskanen, O., Ollila, P., Peltonen-Sainio, P., Regina, K., Salminen, O., Tuomainen, T., Uusivuori, J., Wall, A.& Packalen, T. 2019. Maankäyttösektorin toimien mahdollisuudet ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Valtioneuvoston kanslia. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 67/2018. 75 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-618-8>
- Lehtilä, A. 2019. Asiantuntija-arvio. VTT. Sähköposti 28.10.2019
- Lehtilä, A., Koljonen, T. et al. Low Carbon Finland 2050 -platform. Energy system pathways towards a low carbon society. Espoo 2014. VTT Technology 165. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T165.pdf>
- Lehtilä, Antti & Koljonen, Tiina 2018. Pathways to Post-fossil Economy in a Well Below 2°C World. In: *Lect. Notes Energy*, Vol. 64, George Giannakidis et al. (Eds): *Limiting Global Warming to Well Below 2°C: Energy System Modelling and Policy Development*.
- Lehtonen, H. 2001. Principles, structure and application of dynamic regional sector model of Finnish agriculture. Academic dissertation. Systems Analysis Laboratory, Helsinki University of Technology. Publisher: Agrifood Research

- Finland, Economic Research (MTTL). Publications 98. Helsinki. 265 pages.
- Lehtonen, H. 2015. Evaluating adaptation and the production development of Finnish agriculture in climate and global change. *Agricultural and Food Science* 24: 219–234.
- Lehtonen, H. & Rankinen, K. 2015. Impacts of agri-environmental policy on land use and nitrogen leaching in Finland. *Environmental Science and Policy* 50: 130–144. doi:10.1016/j.envsci.2015.02.001
- Lehtonen, H. & Niskanen, O. 2016. Promoting clover-grass: Implications for agricultural land use in Finland. *Land Use Policy* 59: 310–319.
- Lehtonen, H., Niskanen, O., Karhula, T. & Jansik, C. 2017. Maatalouden rakennkehitys ja investointitarve vuoteen 2030. Markkinaskenaarioiden vaikutus maatalouden tuotantorakenteeseen. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 19/2017*. 59 s. ISSN 2342-7639 (Verkkojulkaisu).
- Lehtonen, H., & Niemi, J. 2018. Effects of reducing EU agricultural support payments on production and farm income in Finland. *Agricultural and Food Science*, 27(2), 124–137.
- Luke 2019a. Luken tilastopalvelut, hakkuukertymä ja puuston poistuma [viitattu 9.12.2019]. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma/>.
- Luke 2019b. Luken tilastopalvelut, puuston vuotuinen kasvu metsä- ja kitumaalla [viitattu 9.12.2019]. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/metsavarat/>.
- Luke 2019c. Luken tilastopalvelut, puuston tilavuus metsä- ja kitumaalla puulajeittain [viitattu 9.12.2019]. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/metsavarat/>.
- Loulou R. 2008. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part II: Mathematical formulation. *Computational Management Science*, 5(1–2):41–66.
- Loulou R., Labriet M. 2008. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure. *Computational Management Science* 5(1–2): 7–40.
- Loulou R., Remme U., Kanudia A., Lehtilä A., Goldstein G. 2016. Documentation for the TIMES Model. Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). *Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf*
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo, T. & Ylivainio, K. 2019. Lantabiokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot.

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 75 s.

Management, 10, 2: 115-126, DOI: 10.1080/17583004.2018.1557990

Mattinen, M. Heljo, J. & Savolahti, M. 2016. Rakennusten energiankulutuksen perusskenaario Suomessa 2015–2050. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35/2016.

McRoberts, R. E., Næsset, E. & Gobakken, T. 2018. Comparing the stock-change and gain–loss approaches for estimating forest carbon emissions for the aboveground biomass pool. Canadian Journal of Forest Research. 274: 1535-1542. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0295>, <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0295>.

Mikkonen, A. 2019. Suomen tuulivoimayhdistys. Sähköposti 30.10.2019

Niemi, P. 2019. Asiantuntija-arvio, tuulivoima-asiantuntija. Metsähallitus. Sähköposti 10.1.2019.

OECD-FAO 2019. OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028. 1420 s. OECD and Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 9789264312463 (PDF) https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2019-2028_agr_outlook-2019-en

Pöyry 2016. Suomen metsäteollisuus 2015–2035, Loppuraportti. Pöyry Management Consulting.

Pöyry 2017. Hajautetun uusiutuvan energiantuotannon potentiaali ja potentiaalın toteutuminen markkinaehtoisesti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 05/2017.

Seppälä, J., Savolainen, H., Sironen, S., Soimakallio, S., Ollikainen, M. 2019a. Päästövähennyspolku kohti hiilineutraalia Suomea – Hahmotelma. Suomen ilmastopaneeli, Raportti 7/2019.

Seppälä, J., Saikku, L., Soimakallio, S., Lounasheimo, J., Regina, K., Ollikainen, M. 2019b. Hiilineutraalius ilmastopoliitikassa – valtiot, alueet, kunnat. Suomen ilmastopaneeli, Raportti 5/2019.

Särkijärvi, J., Jääskeläinen, S., Lohko-Soner, K. (toim.) (2018). Hiiletön liikenne 2045 – polkuja päästöttömään tulevaisuuteen. Liikenteen ilmastopoliitikan työryhmän väliraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 9/2018. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-555-2>

- Tampio, E., Winquist, E., Luostarinen, S. & Rinne, M. 2019. A farm-scale grass bio-refinery concept for combined pig feed and biogas production. *Water Science and Technology* 80, 6: 1042-1052. doi:10.2166/wst.2019.356
- TEM 2017. Työ- ja elinkeinoministeriö. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja – Energia – 4/2017. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tilastokeskus 2015. Väestöennuste 2015-2065. Suomen Virallinen Tilasto. 10 s. http://tilastokeskus.fi/til/vaenn/2015/vaenn_2015_2015-10-30_fi.pdf
- Tilastokeskus 2018. Energian hankinta ja kulutus. <https://www.stat.fi/til/ehk/index.html>
- Tilastokeskus 2019. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2017. National inventory report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. 15 April 2019. Saatavissa: http://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/fi_eu_nir_2017_2019-03-15.pdf
- Traficom 2020. Tilastotietokanta. http://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi_Liikennekaytossa_olevat_ajoneuvot/030_kanta_tau_103.px/?rxid=d44ee935-a646-4c12-85d6-766dc63e196d
- Tuominen, P., Klobut, K., Tolman, A., Adjei, A., De Best-Waldhober, M. 2012. Energy savings potential in buildings and overcoming market barriers in member states of the European Union. *Energy and Buildings* 51, pp. 48–55.
- Tuominen, P., Forsström, J., Honkatukia, J. 2013. Economic effects of energy efficiency improvements in the Finnish building stock. *Energy Policy* 52, pp. 181–189.
- Tuominen, P., Holopainen, R., Eskola, L., Jokisalo, J., Airaksinen, M. 2014: Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. *Building and Environment* 75, pp. 153–160.
- Turtola, E., Salo, T., Miettinen, A., Iho, A., Valkama, E., Rankinen, K., Virkajärvi, P., Tuomisto, J., Sipilä, A., Muurinen, S., Turakainen, M., Lemola, R., Jauhiainen, L., Uusitalo, R., Grönroos, J., Mylly, M., Heikkinen, J., Merilaita, S., Bernal, J.C., Savela, P., Kartio, M., Salopelto, J., Finér, A. & Jaakkola, M. 2017. Hyötyä taseista. Ravinnetaseiden tulkinta ympäristön ja viljelyn hyödyksi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 15/2017 Luonnonvara-keskus (Luke), Helsinki 2017. 72 s. ISBN: 978-952-326-374-1.

- van Soest, H., den Elzen, M., Forsell, N., Esmeijer, K., van Vuuren, D. 2018. Global and regional greenhouse gas neutrality. Implications of 1.5 °C and 2 °C scenarios for reaching net zero greenhouse gas emissions. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Valtakunnan metsien 11. inventointi (VMI11). 2013. Maastotyön ohjeet 2013. Koko Suomi ml. Ahvenanmaa. Metsäntutkimuslaitos. Moniste. 191 s.
- Valtakunnan metsien 12. inventointi (VMI12). 2017. Maastotyön ohjeet 2017. Luonnonvarakeskus. Moniste. 164 s.
- VN 2019. Valtioneuvosto. Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019. Helsinki: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, julkaisutuotanto. Valtioneuvoston julkaisuja 2019:31. 184 s + app. 29 s. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161931/VN_2019_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- VTT 2018. Growth by integrating bioeconomy and low-carbon economy Scenarios for Finland until 2050. VTT Visions 13.
- YM 2017. Ympäristöministeriö. Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030. Kohti ilmastoviisasta arkea. Ympäristöministeriön raportteja 21/2017. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80703/YMra_21_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K., & Väisänen, P. (toim.) 2014. Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisu. http://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/06/Metsanhoidon_suositukset_ver3_netti_1709141.pdf

Liite A. Puunjalostuksen ja energiakäytön puuntarve aluetasolla Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaarioissa

Metsäteollisuuden tuotantomäärät, metsähakkeen käyttö ja kotitalouksien poltto-puun tarve vuosina 2020–2050 muutettiin kuorellisiksi kiintokuutiometreiksi puun-käyttökertoimien avulla (Suomen metsäteollisuus... 2016). Tuotekohtaiset puun-käyttökertoimet olivat samat, mitä aiemmissa (Koljonen et al. 2017, Aakkula et al. 2019) skenaariotarkasteluissa on käytetty. Säästö-skenaariossa oletettiin, että liu- kosellun tuotannosta 80 % on havukuituun perustuvaa ja 20 % lehtikuituun perus- tuvaa tuotantoa. Jatkuva kasvu-skenaariossa tuotannon puulajisuhteet olivat puo- lestaan 60 % havukuitua ja 40 % lehtikuitua. Sahauksen ja vanerin teon sivutuot- teena syntyvä saha-hake oletettiin hyödynnettävän raaka-aineena kemiallisessa metsäteollisuudessa molemmissa skenaarioissa.

Kotimaisen ainespuun tarve laskettiin vähentämällä metsäteollisuuden puunkäy- töstä tuontipuun osuus. Tuontipuun osudeksi oletettiin 14,5 % metsäteollisuuden käyttämän ainespuun kuorellisesta kokonaismäärästä. Laskelmissa tuontipuusta 52 % oli koivukuitua, 41 % havukuitua, 3 % kuusitukkaa, 2 % koivutukkaa ja 2 % mäntytukkaa molemmissa skenaarioissa. Puutavaralajien suhteelliset %-osuudet perustuvat tuontipuun tuonnin rakenteeseen vuosina 2013–2018 (Metsäteollisuus- den puunkäyttö... 2019). Metsähakkeen ja kotitalouksien käyttämän polttopuun ole- tettiin olevan kotimaista alkuperää molemmissa skenaarioissa.

Metsäteollisuuden ainespuuntarve, metsähakkeen käyttö ja kotitalouksien poltto- puun tarve muunnettiin maakunnittaisiksi korjuumääriksi. Ainespuulla korjuumäärät jaettiin puutavaralajeiksi, joita olivat mäntytukki, kuusitukki, koivutukki, havukuitu, kuusikuitu ja lehti-/koivukuitu. Havukuidussa voi olla sekä mänty- että kuusikuitu- puuta ja siitä valmistetaan havusellua tai liukosellua. Kuusikuidussa on pelkästään kuusikuitupuuta ja siitä valmistetaan mekaanista massaa. Lehtikuidussa voi olla koi- vun ohella haapakuitupuuta ja siitä valmistetaan lehtisellua, liukosellua tai puolisel- lua sc-flutingin raaka-aineeksi. Kotitalouksien käyttämä polttopuu oli valmistettu run- kokuusta, eikä sille ollut puulajirajoitteita. Metsähakkeen raaka-aineita olivat runko- puu, latvusmassa ja kannot. Molemmissa skenaarioissa oletettiin, että kantoja kor- jataan energiantuotantoon korkeintaan miljoona kiintokuutiometriä vuodessa koko maan alueelta.

Maakunnittaisten korjuumäärien jaottelun perusteena olivat puutavaralajien kes- kimääräiset korjuumäärät vuosina 2016–2018 (Teollisuuspuun hakkuut... 2019), metsähakkeen keskimääräinen käyttö vuosina 2012–2018 (Puun energiakäyttö... 2019) ja kotitalouksien polttopuun käyttö 2016/2017 kyselytutkimuksen (Pientalojen polttopuun... 2018) perusteella. Maakunnittaiset käyttömäärät eri tavaralajeilla muuttuivat samassa suhteessa kuin valtakunnan tason käyttömäärät Säästö- ja Jat- kuva kasvu-skenaarioissa vuosina 2020–2050.

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. 70 s. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161408/20-2019-MALULU_.pdf
- Koljonen T., Soimakallio S., Asikainen A., Lanki T., Anttila P., Hildén M., Honkatukia J., Karvosenoja N., Lehtilä A., Lehtonen H., Lindroos T.J., Regina K., Salminen O., Savolahti M., Siljander R. 2017. Energia ja ilmastostrategian vaikutusarviot: Yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017. 106 s. https://tietokayttoon.fi/documents/10616/3866814/21_Energia-+ja+ilmastostrategian+vaikutusarviot+Yhteenvetoraportti/40df1f5f-c99c-47d1-a929-a4c825f71547
- Metsäteollisuuden puunkäyttö 2018 [verkkojulkaisu]. 2019. Helsinki: Luonnonvarakeskus [viitattu: 11.10.2019]. https://stat.luke.fi/mets%C3%A4teollisuuden-puunk%C3%A4ytt%C3%B6-2018_fi
- Pientalojen polttopuun käyttö 2016/2017 [verkkojulkaisu]. 2018. Helsinki: Luonnonvarakeskus [viitattu: 11.10.2019]. https://stat.luke.fi/pientalojen-polttopuun-k%C3%A4ytt%C3%B6-20162017_fi
- Puun energiakäyttö 2018 [verkkojulkaisu]. 2019. Helsinki: Luonnonvarakeskus [viitattu: 11.10.2019]. https://stat.luke.fi/puun-energiak%C3%A4ytt%C3%B6-2018_fi
- Suomen metsäteollisuus 2015-2035. 2016. Loppuraportti X304203. 19.1.2016 [verkkojulkaisu]. Pöyry Management Consulting. https://tem.fi/documents/1410877/2772829/P%C3%B6yry_Suomen+mets%C3%A4teollisuus+2015-2035.pdf/ac9395f8-8aea-4180-9642-c917e8c23ab2
- Teollisuuspuun hakkuut alueittain 2018 [verkkojulkaisu]. 2019. Helsinki: Luonnonvarakeskus [viitattu: 11.10.2019]. https://stat.luke.fi/teollisuuspuun-hakkuut-alueittain-2018_fi

Liite B. Metsikkösimuloinnin kuvaus MELA2016-ohjelmistolla

Metsiköiden kehityspolkujen simulointi

Metsiköitä edustavien laskentakuvioiden käsittely- ja kehitysvaihtoehdot tuotettiin puukohtaisiin malleihin (mm. Hynynen ym. 2002) perustuvalla MELA2016 -ohjelmiston metsikkösimulaattorilla (Hirvelä ym. 2017). MELA-ohjelmistoon sisältyvistä luonnonprosessimalleista ja niiden soveltamisesta tarkemmin, ks. Nuutinen ym. (2007).

Laskentakuvioiden käsittely perustui Tapion metsänhoidon suosituksiin (Äijälä ym. 2014, Koistinen ym. 2016). Ensisijaisen puuntuotannon maalla mahdollisia käsittelyvaihtoehtoja olivat kasvatushakkuut (runkolukuun ja pohjapinta-alaan perustuvat harvennukset ja ylispuiden poisto) ja uudistushakkuut (avohakkuu ja luontaisen uudistamisen hakkuut), säästöpuiden jättäminen uudistushakkuissa, raivaus, maanpinnan käsittely, metsänviljely (istutus ja kylvö), taimikonhoito ja ojitetuilla turvemailla hakkuiden yhteydessä kunnostusojitus. Avohakkuun jälkeen tehtiin aina metsänviljely. Taimikonhoito simuloitiin metsänhoidon suositusten mukaisesti. Rajoitetun puuntuotannon maalla korjattiin vain ainespuuta ja sallittuja hakkuutapoja olivat vain kasvatushakkuut. Kitumailla ei tehty hakkuita. Kokonaan puuntuotannon ulkopuolella olevilla alueilla ei sallittu mitään toimenpiteitä. Kulotus, lannoitus, uudisojitus, pystypuiden karsinta, yläharvennus ja eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatusta eivät olleet mukana simuloinneissa.

Harvennushakkuissa voitiin korjata joko vain ainespuuta, ainespuuta ja energiapuuta (integroitu korjuu) tai vain energiapuuta. Integroidussa korjuussa energiapuu koostui männyn, kuusen, koivun ja haavan osalta rinnankorkeusläpimittaluokista 4-9 cm ja muilla puulajeilla kaikista rinnankorkeusläpimitaltaan vähintään 4 cm:n paksuisista puista. Harvennushakkuiden energiapuu korjattiin kuivahkojen kankaiden ja tätä viljavampien kankaiden mänty- tai lehtipuuvaltaisissa puustoissa kokopuuna. Energiapuu korjattiin rankapuuna em. kasvupaikkoja karummilla kangasmailla, turvemailla tai aina kun pääpuulaji oli kuusi. Avohakkuukohteilla voitiin korjata joko vain ainespuuta tai, kun kyseessä on kivennäismailla lehtomainen, tuore tai kuivahko kangas, ainespuun lisäksi a) hakkuutähdettä (oksat ja latvahukkapuu) tai b) hakkuutähdettä ja kantoja. Kun avohakkuukohteessa korjattiin energiapuuta, 70 % hakkuutähteestä (oksat ja runkopuu) otettiin talteen. Kantojen nostokohteilla korjattiin läpimitaltaan vähintään 25 cm:n paksuiset kannot, joista saatiin talteen 85 %. Luontaisesti uudistettavilta aloilta korjattiin vain ainespuuta.

Harvennushakkuiden simulointi noudatti metsänhoidon suositusten mukaisia harvennusmalleja. Harvennushakkuut olivat mahdollisia myös uudistuskypsissä metsiköissä ja harvennusten lukumäärää metsikön kiertoajan puitteissa ei rajoitettu. Peräkkäisten hakkuiden välinen aika oli oltava vähintään 10 vuotta, ojitusalueilla kuitenkin vähintään 20 vuotta. Metsiköiden kehitystä ennustettaessa harvennus- ja uudistushakkuuvaihtoehtojen rinnalle simuloitiin aina myös pelkkä puuston kasvatusvaihtoehto ilman hakkuutoimenpiteitä.

Kasvuntason kalibrointi

Metsämaan pohjapinta-alan kasvumallit on kalibroitu valtakunnan metsien 11. inventoinnin (VMI11) kasvunmittausten perusteella (Valtakunnan metsien... 2013). Ennen kalibrointia kasvunmittaukset on indeksikorjattu vastaamaan vuosien 1984–2013 läpimitan kasvun keskitasoa (Korhonen ym. 2007). Kalibrointiin on käytetty vuosina 2009–2013 mitattuja koepuita sellaisilta metsämaan koelajoilta, jotka kuuluivat kokonaisuudessaan samaan metsikkökuvioon ja joita ei ollut hakkuin käsitelty viimeiseen 10 vuoteen. Laskennassa käytettyä kasvuntason kalibrointia on kuvattu yksityiskohtaisesti MELA Tulospalvelussa VMI11-aineistolla tehtyjen laskelmien osalta (Luke 2019a).

Vuosien 1984–2013 keskimääräiselle tasolle kalibroidun pohjapinta-alan kasvun avulla laskettua tilavuuskasvun arviota tarkennettiin vielä lopuksi ottamalla kasvun arviossa huomioon kalibroitajakson keskivuodesta (1999) vuoteen 2017 tapahtunut lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus Matalan ym. (2005) funktioiden avulla. Kalibroitajakson keskivuodelle laskettiin edeltäneen 30 vuoden (1970–1999) lämpötilan ja CO₂:n keskiarvot ja vuodelle 2017 vastaavasti vuosien 1988–2017 lämpötilan ja CO₂:n keskiarvot ja näiden erotukset (Etelä-Suomi 0,89 °C ja 41,2 ppm; Pohjois-Suomi 0,996 °C ja 41,2 ppm) annettiin syötteenä Matalan ym. (2005) funktioihin (Aakkula ym. 2019). Näin saatu tilavuuskasvun arvio oli vuosille 2015–2024 vuosina 2015–2017 toteutuneiden hakkuiden tasoa noudattaen koko Suomessa 107,0 milj. m³/v, kun VMI12 mitattu kasvu oli 107,8 milj. m³/v (keskivuosi 2013) (Luke 2019b).

Puutavaralajeittaisten tilavuuksien laskenta

Puutavaralajien tilavuuksien laskennassa käytettiin hyväksi Laasasenahon (1982) puun rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuvia, puulajeittain laadittuja runkokäyräyhtälöitä. Koska rungon dimensioihin perustuva apteeraus ei ota huomioon puun rungossa esiintyviä laatuvikoja (esim. oksikkuutta tai mutkaisuutta), apteerauksessa saatua yksittäisen puun tukkitilavuutta korjattiin laskennassa VMI8- ja VMI9-aineistoihin perustuvalla tukkivähennysmallilla (Mehtätalo 2002). Malli pienensi puulle laskettua tukkitilavuutta ja erotus siirtyi kuitupuuksi. Edelleen maakunnittain kalibroitiin näin saatu tukkipuun määrä vastaamaan VMI:n arvioituja tukki-osuuksia puulajeittain laskelmien alkutilanteessa.

Lisäksi apteerauksen tuloksena saatua hakkuutähteen osuutta kalibroitiin MELA2016-ohjelmistoon lisätyn ominaisuuden avulla, jolla ainespuuhakkuissa hakkuutähteen osuutta hakkuupoistumasta kalibroitiin VMI11-aineistosta arvioiduilla osuuksilla puulajeittain ja hakkuutavoittain. Skenaariolaskelmien tuloksena saatu hakkuutähteen keskimääräinen osuus ei täsmälleen vastaa VMI11-aineiston mukaista keskiarvoa johtuen hakkuiden erilaisesta kohdentumisesta puulajeittain ja hakkuutavoittain. Kalibroinnissa hakkuutähteen mahdollinen lisäys vähensi ainespuukertymää, alkaen kuitupuusta, vastaavalla tilavuudella.

Hintaoletukset

Nettotulojen nykyarvon laskenta perustui ainespuun (tukki- ja kuitupuun) osalta tienvarsihintoihin ja energiapuun osalta käyttöpistehintoihin. Nettotulot saatiin vähentämällä näin lasketuista hakkuutuloista ainespuun korjuun, energiapuun korjuun (sisälsi myös kuljetuskustannukset käyttöpisteeseen) ja metsänhoidon simuloituiden kustannukset.

Ainespuun osalta tienvarsihinnat laskettiin lisäämällä toteutuneisiin kantohintoihin vuosien 2008–2017 koko Suomessa keskimäärin toteutuneet reaaliset (v. 2017 rahanarvo) korjuukustannukset (Luke 2019c). Kantohinnat määritettiin maakunnittain ja puutavaralajeittain siten, että kunkin puutavaralajin kantohintana käytettiin vuosina 2008–2017 toteutunutta keskimääräisiä yksikköhintaa (€/m³) (Luke 2019d) vuoden 2017 hintatasoon muunnettuna (taulukko 1). Tienvarsihinnan laskennassa käytetty keskimääräinen korjuukustannus oli tukin osalta 7,75 €/m³ ja kuitupuun osalta 14,20 €/m³.

Metsähakkeen käyttöpistehinta (€/m³) perustui Tilastokeskuksen energiatilaston (Tilasto: Energian... 2019) vuosien 2007–2016 määrillä painotettuun reaaliseseen keskihintaan (v. 2017 rahanarvo) €/Mwh, joka muutettiin kuutiometrihinnaksi kertomella 2. Laskelmissa käytetyt eri energijakeiden käyttöpistehinnat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 1. Laskennassa käytetyt maakunnittaiset eri puutavaralajien kantohinnat, joina käytettiin vuosina 2008–2017 toteutuneita keskiarvoja (€/m³) puutavaralajeittain vuoden 2017 hintatasoon muutettuna (Luke 2019d). Koivukuidun hintaa käytettiin myös muiden lehtipuiden tukille ja kuidulle.

Maakunta	Tukin kantohinta, €/m ³			Kuitupuun kantohinta, €/m ³		
	Mänty	Kuusi	Koivu	Mänty	Kuusi	Koivu
Uusimaa	56,70	58,15	42,85	15,45	19,10	15,35
Varsinais-Suomi	57,35	58,25	39,20	16,75	19,75	16,20
Satakunta	57,35	58,25	39,20	16,75	19,75	16,20
Kanta-Häme	57,50	58,50	43,60	15,90	19,10	15,90
Pirkanmaa	57,10	58,55	40,80	16,35	19,45	16,10
Päijät-Häme	57,50	58,50	43,60	15,90	19,10	15,90
Kymenlaakso	58,00	58,25	43,85	16,35	18,80	15,60
Etelä-Karjala	58,00	58,25	43,85	16,35	18,80	15,60
Etelä-Savo	57,60	57,85	46,05	16,10	18,25	15,65
Pohjois-Savo	55,05	57,05	42,85	15,70	17,65	15,65
Pohjois-Karjala	56,05	56,20	43,65	15,95	17,60	15,10
Keski-Suomi	56,60	58,25	53,85	16,35	19,10	16,05
Etelä-Pohjanmaa	56,70	57,35	39,65	17,20	19,40	17,00
Pohjanmaa	56,70	57,35	39,65	17,20	19,40	17,00
Keski-Pohjanmaa	56,70	57,35	39,65	17,20	19,40	17,00
Pohjois-Pohjanmaa	53,70	54,25	38,55	16,65	18,75	16,45
Kainuu	52,90	53,70	43,00	15,65	17,75	15,15
Lappi	49,35	48,15	15,30	15,85	17,45	15,30
Ahvenanmaa	39,95	40,95	34,70	16,65	16,65	13,55

Taulukko 2. Laskennassa käytetyt metsähakkeen käyttöpistehinnat energijakeittain.

Energiajake	Käyttöpistehinta, €/m³
Ranka	40,20
Oksatähde	40,20
Kanto ja juuret	40,20

Simuloidut korjuukustannukset laskettiin korjuun ajanmenekin ja korjuun yksikköhintojen tulona. Taulukossa 3 on esitetty laskelmissa käytetyt korjuun yksikköhinnat ainespuun ja taulukossa 4 vastaavat yksikköhinnat energiapuun korjuun osalta. Laskennassa käytetyt ajanmenekifunktiot perustuivat useisiin työaikatutkimuksiin ainespuun (mm. Kuitto ym. 1994, Rummukainen ym. 1995, Rajamäki ym. 1996, Väkevä ym. 2001, Metsäalan palkkauksen ... 2010) ja energiapuun korjuun (mm. Laitila 2010, Laitila ym. 2004, 2007, Kärhä ym. 2004, 2006, Heikkilä ym. 2005) osalta.

Taulukko 3. Laskelmissa sovelletut korjuun yksikköhinnat sisältävät palkkojen lisäksi yrittäjävoiton, henkilösivukustannukset ja työvälinekorvaukset.

Työlaji	Yksikköhinta, €/h
Metsäkuljetus	70,00
Hakkuu monitoimikoneella	95,00
Metsurihakkuu	28,20

Taulukko 4. Laskelmissa sovelletut energiapuun hankinnan yksikköhinnat sisältävät palkkojen lisäksi henkilösivukustannukset ja työvälinekorvaukset. Energiapuun korjuulle ei kohdistettu korjuu- tai haketusukia.

Työlaji	Yksikköhinta
Metsäkuljetus, €/h	70,00
Hakkuu monitoimikoneella, €/h	95,00
Metsurihakkuu, €/h	28,20
Kantokaivuri, €/h	70,00
Tienvarsihaketiin, €/h	210,00
Kaukokuljetus, €/h	75,00
Lastaus ja purku, €/h	55,00
Käyttöpistemurskain, €/m ³	2,80

Metsänhoitotöiden kustannukset laskettiin työmäärien ja vuosina 2007–2016 toteutuneiden keskimääräisten, vuoden 2017 hintatasoon muutettujen yksikköhintojen (Luke 2019e) tulona. Laskelmissa käytetyt metsänhoidon yksikkökustannukset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Metsänhoitotöiden yksikköhintoja käytettiin vuosina 2007–2016 toteutuneita keskimääräisiä hintoja vuoden 2017 hintatasoon muutettuna.

Työlaji	Etelä-Suomi	Pohjois-Suomi
Äestys , €/ha	254,00	185,00
Auraus/mätästys, €/ha	363,00	280,00
Männyn kylvö (siemenet), €/ha	237,00	209,00
Männyn taimi, €/taimi	0,15	0,15
Kuusen taimi, €/taimi	0,17	0,17
Koivun taimi, €/taimi	0,30	0,30
Männyn täydennystaimi, €/taimi	0,18	0,18
Kuusen täydennystaimi, €/taimi	0,26	0,26
Koivun täydennystaimi, €/taimi	0,40	0,40
Istutus- ym. metsänhoitotyö, €/h	20,95	20,95
Ruuhous, €/ha	264,00	224,00
Raivaus- ja taimikon perkaus, €/h	28,20	28,20
Kunnostusojitus, €/ha	195,00	167,00
Suunnittelu- ja työnjohtotyö, €/h	20,95	20,95

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. 70 s. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161408/20-2019-MALULU_.pdf
- Heikkilä, J., Laitila, J., Tantt, V., Lindblad, J., Siren, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K.T. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. 56 s. ISBN 951-40-1464-4 (PDF), ISSN 1795-150X. Saantitapa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp010.htm>.
- Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempiäinen, R. and Salminen, O. 2017. MELA2016 Reference Manual. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017. 547 p. ISBN 978-952-326-1 (Online).
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 116 s. Koistinen, A., Luiro, J.-P. & Vanhatalo, K. (toim.). 2016. Metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen, työopas. Tapion julkaisu. Saantitapa: https://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/06/MHS-Energiapuun-korjuun-suositukset_verkkojulkaisu2.pdf

- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. & Pitkänen, J. 2007. Suomen metsävarat metsäkeskuksittain 2004-2006 ja metsävarojen kehitys 1996-2006. Metsätieteen aikakauskirja 2B/2007:149-213.
- Kuitto, P.-J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus 410. 38 s. + liitteet.
- Kärhä, K., Vartiamäki, T., Liikkanen, R., Keskinen, S. & Lindroos, J. 2004. Hakkuutähteen paalauksen ja paalien metsäkuljetuksen tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 179. 88 + 6 s. ISSN 1459-773X, ISSN 1796-2374 (PDF).
- Kärhä, K., Keskinen, S., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006. Kokopuun korjuu nuorista metsistä. Metsätehon raportti 193. 79 + 3 s. ISSN 1459-773Z, ISSN 1796-2374 (PDF).
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communicationes Institutii Forestalis Fenniae 108. 74 s.
- Laitila, J., Asikainen, A., Sikanen, L., Korhonen, K.T. & Nuutinen, T. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogiikka. Metlan työraportteja 3. 58 s. ISBN 951-40-1932-6 (PDF), ISSN 1795-150X. Saantitapa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp003.htm>.
- Laitila, J., Ala-Fossi, A., Vartiamäki, T., Ranta, T. & Asikainen, A. 2007. Kantojen noston ja metsäkuljetuksen tuottavuus. Metlan työraportteja 46. 26 s. ISBN 951-40-2033-9 (PDF), ISSN 1795-150X. Saantitapa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp046.htm>.
- Laitila, J. 2010. Kantojen korjuun tuottavuus. Metlan työraportteja 150. 29 s. ISBN 951-40-2225-8 (PDF), ISSN 1795-150X. Saantitapa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp150.htm>.
- Luke 2019a. MELA Tulospalvelu, VMI11 (mittausvuodet 2009-2013) [viitattu 4.12.2019]. Saantitapa: <http://www.luke.fi/mela-metsalaskelmat/>.
- Luke 2019b. Luken tilastopalvelut, puuston vuotuinen kasvu metsä- ja kitumaalla [viitattu 4.12.2019]. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/metsavarat/>.
- Luke 2019c. Luken tilastopalvelut, teollisuuspuun korjuu ja kaukokuljetus [viitattu 1.7.2018]. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/teollisuuspuun-korjuu-ja-kaukokuljetus/>.

- Luke 2019d. Luken tilastopalvelut, teollisuuspuun kauppa [viitattu 1.7.2018]. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/teollisuuspuun-kauppa/>.
- Luke 2019e. Luken tilastopalvelut, metsänhoito- ja metsänparannustyöt [viitattu 1.9.2018]. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/metsanhoito-ja-metsanparannus-tyot/>.
- Matala, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R. & Kellomäki, S. 2005. Introducing effects of temperature and CO₂ elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. *Ecological Modelling* 181(2-3): 173-190.
- Mehtätalo, L. 2002. Valtakunnalliset puukohtaiset tukkivähennysmallit männylle, kuuselle, koivuille ja haavalle. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2002: 575-591.
- Metsäalan palkkauksen koulutusaineisto. 2010. Metsäalan työehtosopimus 1.6.2010 - 31.8.2012 -liite. Maaseudun Työnantajaliitto, Metsähallitus, Metsäteollisuus ry, Yksityismetsätalouden Työnantajat, Puu- ja erityisalojen liitto.
- Nuutinen, T., Hirvelä, H., Salminen, O. & Härkönen, K. 2007. Alueelliset hakkuumahdollisuudet valtakunnan metsien 10. inventoinnin perusteella, maastotyöt 2004-2006. *Metsätieteen aikakauskirja* 2B/2007: 215-248.
- Rajamäki, J., Kariniemi, A. & Oijala, T. 1996. Koneellisen harvennushakkuun tuotavuus. *Metsätehon raportti* 8. Metsäteho Oy, Helsinki. 20 s. ISSN 1796-2374 (PDF).
- Rummukainen, A., Alanne, H. & Mikkonen, E. 1995. Wood procurement in the pressure of change - valuation model till year 2010. *Acta Forestalia Fennica* 248: 1-98. ISBN 951-40-1478-2.
- Ruotsalainen, M. 2007. Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio julkaisusarja 26. Metsäkustannus Oy, Helsinki. 51 s. ISBN 978-952-5694-16-1, ISSN 1239-6117.
- Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu]. 2019. ISSN 1799-7984. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu: haettu 1.7.2018. Saantitapa: <http://www.stat.fi/til/ehi/tup.html>
- Valtakunnan metsien 11. inventointi (VMI11). 2013. Maastotyön ohjeet 2013. Koko Suomi ml. Ahvenanmaa. Metsäntutkimuslaitos. Moniste. 191.
- Väkevä, J., Kariniemi, A., Lindroos, J., Poikela, A., Rajamäki, J. & Uusi-Pantti, K. 2001. Puutavaran metsäkuljetuksen ajanmenekki. *Metsätehon raportti*

123 (Korjattu versio 7.10.2003). Metsäteho Oy, Helsinki. 41 + 3 s. ISSN 1796-2374 (PDF).

Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. (toim.). 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset: energiapuun korjuu ja kasvatust. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisusarja 30. 56 s. ISBN 978-952-5694-59-8, ISSN 1239-6117.

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.). 2014. Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisu. 180 s. ISBN 978-952-6612-32-4.

Liite C. Puuston runkotilavuuden, kasvun ja hakkuukertymän kehitys MALUSEPO-skenaarioissa

Taulukko 1. Puuston runkotilavuuden (milj. m³), biomassan (milj. t) ja hiilivaraston (milj. t) kehitys vuosina 2015–2055.

JATKUVA KASVU	2015	2025	2035	2045	2055
Metsä- ja kitumaan runkopuun tilavuus, milj. m³	2 460,5	2 648,1	2 793,1	2 982,0	3 252,3
Mänty	1 239,7	1 345,6	1 410,4	1 474,3	1 578,1
Kuusi	738,3	803,9	885,9	1 010,9	1 175,3
Lehtipuu	482,4	498,6	496,9	496,8	498,9
Puuntuotannon metsämaan runkotilavuus, milj. m³	2 176,0	2 306,6	2 393,1	2 524,0	2 735,2
Mänty	1 085,9	1 161,5	1 195,9	1 229,5	1 301,9
Kuusi	660,0	708,6	772,6	879,6	1 026,1
Lehtipuu	430,1	436,5	424,6	414,8	407,2
Elävän puuston kokonaisbiomassa, milj. t	1 723,8	1 871,2	1 992,2	2 149,0	2 356,7
Runkopuu	1 002,8	1 076,6	1 132,3	1 204,9	1 309,1
Oksat	343,9	386,0	422,4	468,7	525,0
Kanto ja juuret	377,2	408,6	437,5	475,4	522,6
Puuston sitoma hiili, milj. t C	861,9	935,6	996,1	1 074,5	1 178,4
SÄÄSTÖ	2015	2025	2035	2045	2055
Metsä- ja kitumaan runkopuun tilavuus, milj. m³	2 460,5	2 644,6	2 738,3	2 797,7	2 884,9
Mänty	1 239,7	1 347,4	1 402,2	1 390,8	1 395,0
Kuusi	738,3	801,6	851,8	928,6	1 013,7
Lehtipuu	482,4	495,6	484,2	478,3	476,2
Puuntuotannon metsämaan runkotilavuus, milj. m³	2 176,0	2 303,1	2 338,3	2 339,6	2 367,8
Mänty	1 085,9	1 163,3	1 187,7	1 146,0	1 118,8
Kuusi	660,0	706,3	738,6	797,4	864,5
Lehtipuu	430,1	433,5	412,0	396,3	384,5
Elävän puuston kokonaisbiomassa, milj. t	1 723,8	1 868,7	1 952,9	2 019,4	2 099,2
Runkopuu	1 002,8	1 075,0	1 109,8	1 130,3	1 161,7
Oksat	343,9	385,6	413,9	440,8	469,0
Kanto ja juuret	377,2	408,1	429,2	448,3	468,5
Puuston sitoma hiili, milj. t C	861,9	934,4	976,4	1 009,7	1 049,6

WEM	2015	2025	2035	2045	2055
Metsä- ja kitumaan runkopuun tilavuus, milj. m³	2 460,5	2 684,2	2 845,6	3 021,0	3 253,8
Mänty	1 239,7	1 364,7	1 436,5	1 495,2	1 567,4
Kuusi	738,3	806,8	890,1	1 004,1	1 168,2
Lehtipuu	482,4	512,6	519,0	521,8	518,2
Puuntuotannon metsämaan runkotilavuus, milj. m³	2 176,0	2 342,7	2 445,5	2 563,0	2 736,7
Mänty	1 085,9	1 180,6	1 222,0	1 250,4	1 291,1
Kuusi	660,0	711,5	776,8	872,8	1 019,1
Lehtipuu	430,1	450,5	446,7	439,8	426,5
Elävän puuston kokonaisbiomassa, milj. t	1 723,8	1 895,9	2 025,3	2 165,5	2 338,4
Runkopuu	1 002,8	1 093,1	1 156,3	1 222,9	1 309,1
Oksat	343,9	389,3	425,6	465,5	511,6
Kanto ja juuret	377,2	413,5	443,4	477,0	517,7
Puuston sitoma hiili, milj. t C	861,9	947,9	1 012,7	1 082,8	1 169,2

Taulukko 2. Puuston kokonaiskasvu ja kokonaispoistuma vuosina 2015–2054, milj. m³/v.

JATKUVA KASVU	2015–24	2025–34	2035–44	2045–54
Runkopuun kokonaiskasvu, milj. m ³ /v	106,6	107,3	109,8	117,1
Runkopuun kokonaispoistuma, milj. m ³ /v	87,8	92,7	90,9	90,1
SÄÄSTÖ	2015–24	2025–34	2035–44	2045–54
Runkopuun kokonaiskasvu, milj. m ³ /v	106,6	107,0	108,6	112,7
Runkopuun kokonaispoistuma, milj. m ³ /v	88,1	97,6	102,7	103,9
WEM	2015–24	2025–34	2035–44	2045–54
Runkopuun kokonaiskasvu, milj. m ³ /v	106,5	107,1	110,1	115,7
Runkopuun kokonaispoistuma, milj. m ³ /v	84,1	91,0	92,6	92,4

Taulukko 3. Runkopuun hakkuukertymä sekä oksien ja kantojen korjuumäärä vuosina 2015–2054, milj. m³/v.

JATKUVA KASVU	2015–24	2025–34	2035–44	2045–54
Runkopuun hakkuukertymä, milj. m³/v	75,5	81,8	79,6	77,9
Ainespuukertymä, milj. m³/v	67,2	70,5	68,4	67,5
Mänty	32,0	34,7	33,4	29,8
Kuusi	24,5	25,8	25,4	28,5
Koivu	9,0	8,4	8,5	8,4
Muu lehtipuu	1,8	1,6	1,1	0,8
Tukkikertymä, milj. m³/v	30,1	32,0	34,2	36,7
Mänty	14,2	15,6	16,8	16,4
Kuusi	14,2	14,7	15,7	18,7
Koivu	1,4	1,5	1,5	1,5
Muu lehtipuu	0,3	0,3	0,1	0,1
Kuitukertymä, milj. m³/v	37,1	38,5	34,2	30,8
Mänty	17,9	19,2	16,6	13,3
Kuusi	10,3	11,1	9,7	9,9
Koivu	7,5	6,9	7,0	6,9
Muu lehtipuu	1,4	1,3	0,9	0,7
Ainespuukertymä hakkuutavoittain, milj. m³/v	67,2	70,5	68,4	67,5
Kasvatushakkuu	11,7	19,0	19,0	18,8
Uudistushakkuu	55,5	51,4	49,3	48,6
Energiapuukertymä, milj. m³/v	15,2	18,6	18,8	18,8
Runkopuu	8,3	11,3	11,3	10,4
Oksat	6,0	6,3	6,6	7,5
Kanto ja juuret	0,9	0,9	0,9	0,9
SÄÄSTÖ	2015–24	2025–34	2035–44	2045–54
Runkopuun hakkuukertymä, milj. m³/v	75,8	86,7	91,6	92,2
Ainespuukertymä, milj. m³/v	68,5	75,1	80,1	82,2
Mänty	32,1	35,4	40,2	38,6
Kuusi	24,8	28,2	27,8	31,5
Koivu	9,7	9,9	10,7	11,0
Muu lehtipuu	1,9	1,6	1,4	1,1
Tukkikertymä, milj. m³/v	30,4	32,9	36,0	38,1
Mänty	14,2	15,4	18,7	18,2
Kuusi	14,2	15,7	15,5	18,1
Koivu	1,6	1,6	1,6	1,7
Muu lehtipuu	0,4	0,3	0,2	0,1
Kuitukertymä, milj. m³/v	38,2	42,2	44,1	44,1
Mänty	17,9	20,0	21,5	20,4

Kuusi	10,7	12,6	12,3	13,4
Koivu	8,1	8,3	9,1	9,3
Muu lehtipuu	1,6	1,3	1,2	0,9
Ainespuukertymä hakkuutavoittain, milj. m³/v	68,5	75,1	80,1	82,2
Kasvatushakkuu	11,9	19,0	19,6	20,6
Uudistushakkuu	56,7	56,1	60,5	61,6
Energiapuukertymä, milj. m³/v	14,2	19,4	20,2	19,6
Runkopuu	7,3	11,6	11,5	10,0
Oksat	6,0	6,9	7,8	8,7
Kanto ja juuret	0,9	0,9	0,9	0,9
WEM	2015–24	2025–34	2035–44	2045–54
Runkopuun hakkuukertymä, milj. m³/v	72,0	79,9	81,2	80,7
Ainespuukertymä, milj. m³/v	61,7	67,9	69,2	69,2
Mänty	29,6	34,1	35,7	35,6
Kuusi	23,2	24,7	24,4	24,8
Koivu	7,6	8,0	7,9	7,7
Muu lehtipuu	1,3	1,0	1,1	1,1
Tukkikertymä, milj. m³/v	26,7	28,4	29,0	29,0
Mänty	12,2	13,9	14,7	14,7
Kuusi	13,3	13,2	13,0	13,0
Koivu	1,1	1,1	1,2	1,2
Muu lehtipuu	0,2	0,1	0,1	0,1
Kuitukertymä, milj. m³/v	34,9	39,5	40,2	40,2
Mänty	17,4	20,2	21,0	20,9
Kuusi	9,8	11,5	11,5	11,8
Koivu	6,5	6,9	6,8	6,5
Muu lehtipuu	1,1	0,9	1,0	1,0
Ainespuukertymä hakkuutavoittain, milj. m³/v	61,7	67,9	69,2	69,2
Kasvatushakkuu	10,9	18,9	20,7	20,4
Uudistushakkuu	50,8	49,0	48,5	48,8
Energiapuukertymä, milj. m³/v	17,2	19,1	19,2	19,3
Runkopuu	10,4	12,1	12,0	11,5
Oksat	5,8	6,0	6,2	6,8
Kanto ja juuret	1,0	1,0	1,0	1,0

Liite D. Metsien kehityksen ennustamisen erot MALULU- ja MALUSEPO-laskelmien välillä

Taulukko 1. MALULU- ja MALUSEPO-laskelmien skenaariot, niiden pohjana olevissa aineistoissa ja laskennassa tehdyissä oletuksissa sekä puuston hiilinielujen laskenta. MALUSEPO:n osalta tarkemmat kuvaukset löytyvät liitteestä B.

	MALULU	MALUSEPO
Julkaisu, jossa tulokset raportoitu	Aakkula ym. (2019)	Koljonen ym. (2020) (tämä raportti)
Skenaariot/projektiot	LULUCF-WEM LULUCF-LT1 LULUCF-LT2 LULUCF-LT2i	WEM Jatkuva kasvu Säästö
Laskelma-alue	LULUCF-WEM: maakunta/AMO-alue Muut: osa-alue (Länsi-, Kaakkois-, Väli- ja Pohjois-Suomi)	WEM: maakunta/AMO-alue Muut: osa-alue (Länsi-, Kaakkois-, Väli- ja Pohjois-Suomi)
Ajanjakso, jolle tulokset esitetään	2011–2055	2015–2055
Aineisto		
- VMI-aineisto	VMI11 (2009-2013)	VMI11/12 (2013-2017)
- Aineiston ajantasaisuus	Laskennallinen ajantasaisuus vuoteen 2015 (tilastoidut hakkuut)	Ei ajantasaisuudesta
Muutokset laskelmissa		
- Puuston alkuvaiheen kehityksen simulointi	Avohakkuun jälkeen uudistaminen, muut toimenpiteet vaihtoehtoisia	Avohakkuun jälkeen uudistaminen, taimikonhoito metsänhoidon suositusten mukaisesti
- Luontainen uudistaminen rajoitetun puuntuotannon alueella	Sallittu	Ei sallittu
- Energiapuun korjuu turvemaille	Turvemaille pääosin rangan korjuuta, lisäksi pieniä määriä hakkuutähteiden ja kantojen korjuuta	Turvemaille vain rangan korjuu
- Runkopuun hakkuutähteen laskenta (ainespuihakuissa)	Puiden katkonnän perusteella, hakkuutähteeksi kuitupuun minimimittoja pienempi runkopuu	Puiden katkonnän perusteella, hakkuutähteeksi kuitupuun minimimittoja pienempi runkopuu. Lisäksi hakkuutähteen osuus hakkuupoistumasta kalibroitu VMI11-aineistosta arvioituilla osuuksilla
- Puutavaralajien hinnat	Keskimääräiset tilastoidut vuosilta 2004–2013	Keskimääräiset tilastoidut vuosilta 2008–2017
- Metsänhoitotöiden kustannukset	Keskimääräiset tilastoidut vuosilta 2004–2013	Keskimääräiset tilastoidut vuosilta 2007–2016

	MALULU	MALUSEPO
- Ilmastonmuutoksen vaikutuksen mallinnus	Puuston tilavuuskasvussa huomioitu vuosina 1999–2017 tapahtunut lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus MELA-ohjelmistoon sisältyvien Matala ym. (2005) funktioiden avulla. LULUCF-LT2i-skenaariossa tehtiin RCP2.6 ilmastoskenaarion vaikutusarviot Matala ym. (2005) funktioiden avulla.	Puuston tilavuuskasvussa huomioitu vuosina 1999-2017 tapahtunut lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus MELA-ohjelmistoon sisältyvien Matala ym. (2005) funktioiden avulla
Puuston hiilivaraston muutoksen arvioiminen		
- Hiilivaraston muutoksen laskentamenetelmät	Varastonmuutosmenetelmänä peräkkäisten tilojen eli kokonaisbiomassojen erotuksena	Varastonmuutosmenetelmänä peräkkäisten tilojen eli kokonaisbiomassojen erotuksena
- Biomassojen laskentatavat	Männyn, kuusen ja koivun rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuvat puukohtaiset mallit (Repola 2008, 2009)	Männyn, kuusen ja koivun rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuvat puukohtaiset mallit (Repola 2008, 2009)

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. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161408/20-2019-MALULU_.pdf
- Matala, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R. & Kellomäki, S. 2005. Introducing effects of temperature and CO2 elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. *Ecological Modelling* 181(2-3): 173-190.
- Repola, J. 2008. Biomass equations for Birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605-624. The Finnish Society of Forest Science. The Finnish Forest Research Institute. ISSN 0037-5330.
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625-647. The Finnish Society of Forest Science. The Finnish Forest Research Institute. ISSN 0037-5330.

Liite E. Arviot LULUCF-sektorien päästöjen ja poistumien kehittymisestä eri skenaarioissa

Taulukko 1. LULUCF-sektorin historialliset päästöt ja poistumat maankäyttöluokittain sekä puutuotteille vuosille 2010 ja 2015 sekä niiden kehittyminen WEM-skenaariossa vuoteen 2050 (Mt CO₂-ekv.).

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metsämaa	-32,20	-28,29	-30,64	-28,16	-25,00	-26,66	-28,01	-31,20	-34,43
Viljelysmaa	7,66	7,11	6,72	7,38	7,59	7,65	7,68	7,76	7,88
Ruohikkoalueet	0,75	0,67	0,88	1,12	1,25	1,31	1,28	1,28	1,28
Kosteikot	2,11	2,21	2,07	1,95	1,87	1,86	1,85	1,78	1,70
Rakennettu maa	1,73	0,97	1,31	1,30	1,27	1,18	1,11	1,02	0,92
Puutuotteet	-2,20	-2,73	-3,81	-3,64	-3,50	-3,29	-3,16	-3,08	-2,98
Yhteensä	-22,15	-20,07	-23,46	-20,05	-16,52	-17,94	-19,25	-22,44	-25,63

Taulukko 2. LULUCF-sektorin historialliset päästöt ja poistumat maankäyttöluokittain sekä puutuotteille vuosille 2010 ja 2015 sekä niiden kehittyminen Jatkuva kasvu -skenaariossa vuoteen 2050 (Mt CO₂-ekv.).

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metsämaa	-32,20	-28,29	-26,29	-25,09	-23,53	-27,48	-31,34	-36,56	-42,17
Viljelysmaa	7,66	7,11	6,63	5,92	5,11	4,23	3,31	2,44	1,59
Ruohikkoalueet	0,75	0,67	0,74	0,86	1,02	1,19	1,35	1,37	1,40
Kosteikot	2,11	2,21	1,86	1,85	1,86	1,91	1,93	2,16	2,40
Rakennettu maa	1,73	0,97	1,32	1,34	1,32	1,25	1,17	1,08	0,99
Puutuotteet	-2,20	-2,73	-3,81	-3,94	-4,09	-3,95	-3,99	-4,12	-4,21
Yhteensä	-22,15	-20,07	-19,55	-19,05	-18,31	-22,84	-27,56	-33,62	-40,02

Taulukko 3. LULUCF-sektorin historialliset päästöt ja poistumat maankäyttöluokittain sekä puutuotteille vuosille 2010 ja 2015 sekä niiden kehittyminen Säästö-skenaariossa vuoteen 2050 (Mt CO₂-ekv.).

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metsämaa	-32,20	-28,29	-25,89	-21,40	-16,14	-14,77	-13,01	-14,45	-15,85
Viljelysmaa	7,66	7,11	6,64	6,09	5,47	4,77	4,02	3,31	2,63
Ruohikkoalueet	0,75	0,67	0,74	0,78	0,85	0,93	1,00	1,07	1,13
Kosteikot	2,11	2,21	2,07	1,86	1,68	1,49	1,30	1,30	1,30
Rakennettu maa	1,73	0,97	1,32	1,30	1,24	1,16	1,06	0,93	0,82
Puutuotteet	-2,20	-2,73	-3,90	-4,32	-4,67	-5,32	-5,95	-6,19	-6,42
Yhteensä	-22,15	-20,07	-19,03	-15,70	-11,58	-11,75	-11,58	-14,03	-16,39

Nimeke	Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot
Tekijä(t)	Tiina Koljonen, Jyrki Aakkula, Juha Honkatukia, Sampo Soimakallio, Markus Haakana, Hannu Hirvelä, Harri Kilpeläinen, Leena Kärkkäinen, Juha Laitila, Heikki Lehtonen, Antti Lehtilä, Liisa Maanavilja, Paula Ollila, Hanne Siikavirta, Tarja Tuomainen
Tiivistelmä	<p>Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelmaan 10.12.2019 on kirjattu "Hallitus toimii tavalla, jonka seurauksena Suomi on hiilineutraali vuonna 2035 ja hiilinegatiivinen nopeasti sen jälkeen. Tämä tehdään nopeuttamalla päästövähennystoimia ja vahvistamalla hiilinielua." Hallitusohjelmassa ei täsmennetä hiilineutraaliuden määrittelmää eikä sitä, miten se tulisi saavuttaa. Suomen osalta keskeinen kysymys hiilineutraaliustavoitteeseen liittyen on paitsi tavoitteen aikataulu ja siihen liittyvä kasvihuonekaasujen (KHK) päästövähennyspolku myös maankäytön nettonielujen kehitys vuoteen 2050. Tässä raportissa on esitetty hiilineutraalisuustavoitteen vaikutuksia Suomen KHK-päästöihin ja -poistumiin, energia- ja kansantalouden sekä keskeisiin ympäristövaikutuksiin ja riskeihin. Laskennalliset ja laadulliset analyysit pohjautuvat helmikuussa 2019 julkaistuihin arvioihin Suomen pitkän aikavälin kokonaispäästökäytöstä (PITKO-hanke) sekä maatalouden ja maankäyttösektorin päästökäytöstä (MALULU-hanke), jotka toteutettiin osana valtioneuvoston vuoden 2018 selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. PITKO- ja MALULU- selvitysten keskeinen tulos oli, että Suomi voisi saavuttaa hiilineutraaliuden 2040-luvulla, joten tulos ei ollut linjassa nykyisen hallitusohjelman ilmastotavoitteen kanssa. Tässä raportissa on esitetty VTT:n koordinoiman PITKO-jatko -hankkeen ja Luken toteuttaman MALUSEPO-hankkeen keskeiset tulokset ja skenaariolaskelmien lähtökohdat siltä osin, kun ne ovat muuttuneet verrattuna helmikuussa 2019 valmistuneihin VN-TEAS-raportteihin. PITKO-jatko -hanke toteutettiin työ- ja elinkeinoministeriön toimeksiannosta ja sen toteutukseen osallistuivat VTT:n lisäksi Syke ja Merit Economics. MALUSEPO-hanke toteutettiin maa- ja metsätalousministeriön toimeksiannosta.</p> <p>PITKO-hankkeessa kokonaispäästötarkastelut perustuivat vertailuskenaarion (WEM) ja neljän vaihtoehdoisen vähäpäästökenaarion (Jatkuva kasvu, Säästö, Muutos ja Pysähdys) laskennallisiin ja laadullisiin analyyseihin. PITKO-jatko- ja MALUSEPO-hankkeissa tarkastelut rajattiin WEM-, Jatkuva kasvu - ja Säästö-skenaarioiden päivittämiseen siten, että laskelmissa on hyödynnetty uusinta tilastollista ja muuta tietoa. Esimerkiksi LULUCF-sektorin metsänielujen laskennassa Luke on käyttänyt tuoreempaa valtakunnan metsien inventointitietoa (VM11/12), joka on vuosilta 2013–2017, kun taas MALULU:ssa käytetty inventointitieto oli peräisin vuosilta 2009–2013. Laskelmien mukaan nykyisillä toimilla hiilineutraalisuutta ei saavuteta ennen vuotta 2050 ja silloinkin ainoastaan, jos maankäytön nettonielut ovat noin 30 Mt CO₂ ekv. -tasolla. Jatkuva kasvu- ja Säästö-skenaarioissa hiilineutraalisuus sen sijaan saavutetaan vuonna 2035, mutta se edellyttää merkittävää KHK-päästöjen vähentämistä erityisesti jaksolla 2030–2035 sekä lisäksi sitä, että maankäytön nettonielut kehittyisivät laskelmien mukaisesti.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8722-3 ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Verkkojulkaisu) DOI: 10.32040/2242-122X.2020.T366
Julkaisuaika	Tammikuu 2020
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	131 s. + liitt. 17 s.
Projektin nimi	PITKO-jatkotyö & Maatalous- ja LULUCF-sektorien kasvihuonekaasujen päästö- ja poistumaskenaariot vuoteen 2050 (MALUSEPO)
Rahoittajat	Työ- ja elinkeinoministeriö & maa- ja metsätalousministeriö
Avainsanat	Hiilineutraalius, vähäpäästö, strategia, skenaario, päästövähennys, hiilinielut, maankäyttö
Julkaisija	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111, https://www.vtt.fi/

Title	Carbon neutral Finland 2035 – Scenarios and impact assessments
Author(s)	Tiina Koljonen, Jyrki Aakkula, Juha Honkatukia, Sampo Soimakallio, Markus Haakana, Hannu Hirvelä, Harri Kilpeläinen, Leena Kärkkäinen, Juha Laitila, Heikki Lehtonen, Antti Lehtilä, Liisa Maanavilja, Paula Ollila, Hanne Siikavirta, Tarja Tuomainen
Abstract	<p>Programme of Prime Minister Sanna Marin's Government 10 December 2019 says "The Government will work to ensure that Finland is carbon neutral by 2035 and carbon negative soon after that. We will do this by accelerating emissions reduction measures and strengthening carbon sinks." The Government programme does not give any precise definition for the carbon neutrality or how this will be reached. The central questions for Finland are not only related to the greenhouse gas (GHG) emission pathways but also the development of the net carbon sinks of the land use sector by 2050. In this report, we present the impact assessments of the carbon neutrality target on GHG emissions and removals, energy and national economies, and on environmental impacts and risks. The quantitative and qualitative impact assessments are based on earlier studies called PITKO (Long-term development of total emissions) and MALULU (Development of emissions and sinks in the agricultural and LULUCF sectors until 2050), which were published on February 2019 as part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research for 2018. The results of PITKO and MALULU analysis indicated that Finland could reach carbon neutrality in the 2050's, which is not in line with the targets of the Governmental programme. Therefore, two follow-up projects (PITKO-jatko and MALUSEPO) by VTT Technical Research Centre of Finland, Natural Resource Institute Finland, the Finnish Environment Institute SYKE, and Merit Economics were carried out to update the scenarios and impact assessments to fulfill the 2035 carbon neutrality target. The projects were financed by the Ministry of the Economic Affairs and Employment and the Ministry of Agriculture and Forestry of Finland.</p> <p>The analysis of the PITKO project were based on the reference scenario (WEM) and four alternative low emission scenarios (Continuous Growth, Save, Change and Stagnation). In the PITKO-jatko and MALUSEPO projects the WEM, Continuous Growth, and Save scenarios were updated so that also the new statistical and inventory information were used in the assessments, including the new National Forest Inventory (NF11/12) from the years 2013-2017. The results indicated that with existing measures the carbon neutrality could be reached just before 2050 if the net carbon sinks of the land use sector grow up to 30 Mt CO₂ ekv. In the Continuous Growth and Save scenarios the carbon neutrality is reached in 2035 but it requires remarkable reduction of GHG emissions between 2030-2035 in addition to development of the carbon net sinks according to the calculations.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8722-3 ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Online) DOI: 10.32040/2242-122X.2020.T366
Date	January 2020
Language	Finnish, English abstract
Pages	131 p. + app. 17 p.
Name of the project	PITKO follow-up and MALUSEPO projects
Commissioned by	The Ministry of the Economic Affairs and Employment and the Ministry of Agriculture and Forestry of Finland
Keywords	Carbon neutrality, low emission, strategy, scenario, emission reduction, carbon sinks, land use
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111, https://www.vttresearch.com

Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot

Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelmaan 10.12.2019 on kirjattu "Hallitus toimii tavalla, jonka seurauksena Suomi on hiilineutraali vuonna 2035 ja hiilinegatiivinen nopeasti sen jälkeen. Tämä tehdään nopeuttamalla päästövähennystoimia ja vahvistamalla hiilinieluja." Hallitusohjelmassa ei täsmennetä hiilineutraaliuden määritelmää eikä sitä, miten hiilineutraalius tulisi saavuttaa. Tässä raportissa on arvioitu hiilineutraalisuustavoitetta päästövähennyspolkujen näkökulmasta eri sektoreilla. Lisäksi on arvioitu energia- ja kansantalouteen sekä ympäristöön kohdistuvia keskeisiä vaikutuksia ja riskejä.

ISBN 978-951-38-8722-3
ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-122X (Verkkojulkaisu)
DOI: 10.32040/2242-122X.2020.T366