

Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen kehitykset

Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset

Antti Lehtilä, Tiina Koljonen, Juhani Laurikko, Johanna Markkanen, Terttu Vainio

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2021:67

tietokayttoon.fi

Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen kehitykset

Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset

Antti Lehtilä, Tiina Koljonen, Juhani Laurikko, Johanna Markkanen, Terttu Vainio, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Julkaisumyynti

Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston
verkkokirjakauppa**

Statsrådets
nätbokhandel

vnjulkaisumyynti.fi

Valtioneuvoston kanslia

© tekijät ja valtioneuvoston kanslia

ISBN pdf: 978-952-383-318-0

ISSN pdf: 2342-6799

Taitto Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2021

Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen kehitykset Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:67

Julkaisija Valtioneuvoston kanslia

Tekijä/t Antti Lehtilä, Tiina Koljonen, Juhani Laurikko, Johanna Markkanen, Terttu Vainio

Yhteisötekijä Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Kieli Suomi **Sivumäärä** 81

Tiivistelmä Tutkimus on tehty *Hiilineutraali Suomi 2035* (HIISI) -hankkeessa. Selvitys palvelee ilmasto- ja energiastrategian sekä keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman (KAISU) valmistelua. Analyysien pohjana ovat kaksi skenaariota, WEM ja WAM, joista WAM-skenaario sisältää hahmotellut uudet politiikkatoimet ja ohjauskeinot. Työssä on laadittu sektorikohtaiset analyysit kotimaanliikenteelle, työkoneille, maataloudelle ja rakennusten energiakäytölle sekä integroiva koko energiajärjestelmän skenaario-tarkastelu vuoteen 2050.

Tulosten mukaan Suomi voi WAM-skenaarion mukaisin politiikkatoimin saavuttaa sekä ilmastolakiehdotuksen mukaiset tiukennetut kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen vähennystavoitteet että EU:n taakanjakosektorille esittämät uudet tavoitteet vuonna 2030, kunhan ilmastotietoisuus heijastuu riittävästi kuluttajien ja muiden toimijoiden valinnoissa sekä investoineissa.

Integroidussa tarkastelussa kasvihuonekaasupäästöjen lisävähennystarve taakanjakosektorilla on 5,2–5,5 Mt CO₂-ekv. vuosina 2030–2035. Lisävähennyksistä huomattavin osa kohdistuisi liikenteeseen (1,6–2,5 Mt) muun muassa voimakkaamman sähköistymisen, biokaasun käytön ja energiatehokkuuden paranemisen myötä. Lisätoimia kohdistuu myös kaikille muille taakanjakosektoreille, erityisesti rakennusten erillislämmitykseen, työkoneisiin ja F-kaasupäästöihin.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa.(tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

Asiasanat tutkimus, tutkimustoiminta, energiatalous, ilmastopolitiikka, kasvihuonekaasupäästöt, skenaario

ISBN PDF 978-952-383-318-0

ISSN PDF 2342-6799

Julkaisun osoite <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-318-0>

Utveckling av energisystemet och utsläpp av växthusgaser Kolneutral Finland 2035 – åtgärder i klimatpolitiken och deras effekter

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2021:67

Utgivare Statsrådets kansli

Författare Antti Lehtilä, Tiina Koljonen, Juhani Laurikko, Johanna Markkanen, Terttu Vainio

Utarbetad av Teknologiska forskningscentralen VTT Ab

Språk Fiinska

Sidantal 81

Referat Studien gjordes inom projektet *Kolneutral Finland 2035* (HIISI). Studien stödjer förberedelserna för den uppdaterade klimat- och energistrategin och den medellånga klimatpolitiska planen (KAISU). Analyserna baserades på två scenarier, WEM och WAM, varav WAM -scenariot innehåller de nya policys och instrument som övervägs. Sektorsspecifika analyser utfördes för inrikes transporter, arbetsmaskiner, jordbruk och energianvändning av byggnader och en integrerad scenarionanalys för hela energisystemet fram till 2050.

Resultaten indikerar att de strama nya målen för de totala utsläppen, som anges i den nya klimatlagen, liksom de för insatsdelningssektorerna, kan nås genom att genomföra den politik och åtgärder som ingår i WAM -scenariot, så länge klimatet medvetenhet återspeglas tillräckligt i konsumenternas och val och i andra ekonomiska aktörers investeringsbeslut.

Enligt den integrerade energisystemanalysen är behovet av ytterligare utsläppsminskningar som ska realiseras inom insatsdelningssektorerna 5,2–5,5 Mt CO₂ -ekv. under 2030–2035. Den mest märkbara delen av den extra bördan skulle falla på transportsektorn (1,6–2,5 Mt), till stor del genom intensifierad elektrifiering, ökad användning av biogas och energieffektivitet. Ytterligare åtgärder skulle även riktas till alla andra insatsdelningssektorer, särskilt värmesystem, arbetsmaskiner och utsläpp av F-gas.

Klausul Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan.(tietokayttoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

Nyckelord forskning, forkningsverksamhet, energiekonomi, klimatstrategi, växthusgaser, scenario

ISBN PDF 978-952-383-318-0

ISSN PDF 2342-6799

URN-adress <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-318-0>

Development of the energy system and greenhouse gas emissions Carbon neutral Finland 2035 – impact assessments of climate and energy policies and measures

Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2021:67

Publisher Prime Minister's Office

Author(s) Antti Lehtilä, Tiina Koljonen, Juhani Laurikko, Johanna Markkanen, Terttu Vainio

Group author VTT Technical Research Centre of Finland Ltd

Language Finnish **Pages** 81

Abstract The study was made within the project "*Carbon neutral Finland 2035*". The study supports the preparation for the updated Climate and Energy Strategy and the Medium-term Climate Change Policy Plan (KAISU). The analyses were based on two scenarios, WEM and WAM, of which the WAM scenario includes the new policies and instruments considered. Sector-specific analyses were carried out for domestic transportation, work machines, agriculture and building energy use, and an integrated scenario analysis for the whole energy system up to 2050.

The results indicate that the tight new targets for the total emissions, as stated in the new Climate Act, as well as those for the effort sharing sectors, can be reached by implementing the policies and measures included in the WAM scenario, as long as climate awareness is sufficiently reflected in consumers' and choices and in the investment decisions of other economic actors.

According to the integrated energy systems analysis, the need for additional emission reductions to be realized within the effort sharing sectors is 5,2–5,5 Mt CO₂ eq. during 2030–2035. The most prominent part of the added burden would fall on the transport sector (1,6–2,5 Mt), largely through intensified electrification, increasing use of biogas and energy efficiency. Additional measures would be directed also to all other effort sharing sectors, in particular in-house heating systems, work machines and F-gas emissions.

Provision This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.

Keywords research, research activities, energy economy, climate change policy, greenhouse gas emissions, scenario

ISBN PDF 978-952-383-318-0 **ISSN PDF** 2342-6799

URN-address <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-318-0>

Sisältö

1	Johdanto	9
2	Menetelmät ja laskentamallien kuvaukset.....	11
2.1	Tarkasteluun käytetty energiajärjestelmämalli	11
2.2	Liikenteen ALISA-malli	13
2.3	Työkoneiden Tyko-malli	14
2.4	Rakennuskannan FineBuild ja VTT-Build-mallit	15
3	WEM- ja WAM-skenaarioiden kuvaukset.....	16
3.1	Yleiset lähtöoletukset	16
3.2	Päästövähennystavoitteet ja päästöoikeuden hinnan kehitys	17
3.3	Politiikkatoimet WEM- ja WAM-skenaarioissa.....	19
3.3.1	WEM-skenaario	19
3.3.2	WAM-skenaario	20
3.4	Polttoaineiden hintojen kehitykset.....	23
3.5	Väestön ja kansantalouden kehitykset.....	25
3.6	Teollisuuden kehitys.....	27
3.7	Maatalouden kehitys	30
3.8	Liikennesektorin kehitys	33
3.8.1	Liikennesuoritteiden kysynnän kehitys	33
3.8.2	Ajoneuvokannan ja -tekniikan kehitys	34
3.9	Työkonekannan kehitys.....	36
3.10	Asuin- ja palvelurakennuskannan kehitykset	37
3.11	Sähkön tuotantovaihtoehdot.....	39
3.12	Vaihtoehtoisten polttoaineiden tuotanto	40
3.12.1	Biopolttonesteet.....	40
3.12.1	Biokaasu.....	41
3.12.1	Vety	41
3.12.1	Sähkölaitteet.....	42
4	Energiajärjestelmän kehitys	43
4.1	Energian hankinta	43
4.2	Energian kulutus	50

5	Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys	59
5.1	Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys	59
5.2	Taakanjakosektorin päästöjen kehitys	67
5.3	Kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien kehitys	70
6	Johtopäätökset.....	73
6.1	Politiikkatoimien vaikuttavuus.....	73
6.2	Integroidun ja sektoritarkasteluiden eroista.....	75
	Lähteet.....	78

ALKUSANAT

Tähän raporttiin on koottu HIISI-hankkeen energijärjestelmätarkastelujen yhteenvedot sekä tarkemmat kuvaukset tutkimusmenetelmistä ja laskennallisista analyyseistä. Kaikkiaan Hiisi-hanketta oli toteuttamassa yli neljäkymmentä tutkijaa viidestä tutkimusorganisaatiosta ja sen tuloksia on raportoitu viidessä osaraportissa sekä kokoaivassa synteesiraportissa.

Hankkeen suunnitelma laadittiin ennen COVID-19 pandemian alkua ja työsuunnitelmaa jouduttiin muuttamaan hankkeen aikana erityisesti julkisten ja kaikille avoimien tilaisuuksien osalta. Hankkeen loppuvaiheessa saatiin myös uutta tietoa paitsi kansallisista myös Euroopan komission ilmasto- ja energiapoliittisista linjauksista ja ehdotuksista. Näitä on pyritty huomioimaan joissain määrin, mutta laskelmat eivät täysin vastaa esimerkiksi hallituksen syyskuun 2021 budjettiriihen päätöksiä.

HIISI-hankkeen tutkijat haluavat kiittää kaikkia haastatteluihin ja tilaisuuksiin osallistuneita henkilöitä ja tahoja. Lisäksi hankeryhmä esittää ohjausryhmälle lämpimät kiitokset työn ohjauksesta ja palautteesta koko hankkeen aikana.

Tiina Koljonen

Marraskuu 2021

1 Johdanto

Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset (HIISI) -hanke on palvellut tutkimus- ja selvitystarpeita ajallisesti rinnan laadittavien kansallisen ilmasto- ja energiastrategian sekä keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman (KAISU) valmistelussa. Hanke on tuottanut myös tarvittavia tietoja ja analyyskejä, joita hyödynnetään EU:n hallintomalliasetuksen mukaisessa raportoinnissa (ns. edistymisraportit) ja EU:lle toimitettavan kansallisen energia- ja ilmastosuunnitelman (National Energy and Climate Plan I. NECP) päivityksessä.

Hankkeen koordinaattorina on toiminut Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja tutkimuspartnereita ovat olleet Suomen ympäristökeskus (Syke), Luonnonvarakeskus (Luke), Terveystieteiden tutkimuskeskus (THL) ja Pellervon taloustutkimus (PTT). HIISI-hanke käynnistyi huhtikuussa 2020 ja se päättyi lokakuussa 2021. Hanketta on ohjannut työ- ja elinkeinoministeriön (TEM), ympäristöministeriön (YM), maa- ja metsätalousministeriön (MMM), liikenne- ja viestintäministeriön (LVM), valtionvarainministeriön (VM), valtioneuvoston kanslian (VNK) ja huoltovarmuuskeskuksen (HVK) edustajat, ja vastuuministerinä on toiminut TEM. Laskennallisten analyysien alustavia tuloksia on lisäksi esitelty ilmasto- ja energiapoliittiselle ministerityöryhmälle sekä ilmastopolitiikan pyöreälle pöydälle.

HIISI-hanke on tuottanut sekä laskennallisia että laadullisia analyyskejä uusien ilmasto- ja energiapoliittisten toimien vaikutuksista eri päästösektoreille, toimialoille, ihmisille, ympäristölle ja luonnolle. Uusien politiikka- ja muiden ohjauskeinojen tavoitteena on varmistaa oikeudenmukainen ja kestävä siirtymä hiilineutraaliin yhteiskuntaan vuoteen 2035 mennessä. HIISI-hankkeen tuottamilla laaja-alaisilla ja monitieteisillä laskennallisilla ja laadullisilla analyysseillä on arvioitu siirtymää systemaattisesti ja integroidusti kattaen sekä suorat että epäsuorat vaikutukset.

Tässä raportissa on esitetty VTT:n laatimat laskelmat energijärjestelmän ja kasvi-huonekaasujen (KHK) päästöjen kehityksistä TIMES-VTT-energiajärjestelmämallilla. TIMES-VTT-mallinnus kattaa kaikki Kioton pöytäkirjan KHK-päästöt ja kaikki energia-sektorit, joten mallinnuksessa energia- ja KHK-päästökehitykset voidaan arvioida integroidusti huomioiden eri sektorien vuorovaikutukset. Mallinnuksen lähtötietoina on käytetty myös muiden mallinnusten tuloksia, ja tässä raportissa on esitetty rakennuskannan, liikenteen ja työkonokannan kehityksiin liittyvät sektorimallinnukset ja niiden lähtöaineistot. Energiajärjestelmän ja KHK-päästökehityksiin liittyviä laskentamenetelmiä ja -malleja on esitetty raportin luvussa 2. Maa- ja metsätalouden kehityksiä on raportoitu Luken laatimassa HIISI-raportissa (Maanavilja ym. 2021). F-kaasujen ja jätesektorin kehityksiä arvioi puolestaan Syke. TIMES-VTT-mallinnuksen tuloksia on toisaalta käytetty lähtötietoina energiapuun kysynnän ja laajemmin koko LULUCF

(Land Use Land Use Change and Forestry) -sektorin sekä kansantalouden kehitysarvioissa. LULUCF-sektorin kehitystä on esitetty Luken (Maanavilja ym. 2021) sekä THL:n ja PTT:n (Honkatukia ym. 2021) laatimissa erillisissä raporteissa.

Keskeinen lähtökohta laskennallisille skenaarioanalyysille on vertailuskenaario, joka kuvastaa kehitystä nykyisessä toimintaympäristössä ottaen huomioon teknologioiden, toimialojen, markkinoiden ja infrastruktuurin kehitykset, heijastellen trendinomaista etenemistä ja huomioiden päätetyt ohjaus- ja politiikkatoimet. Vertailuskenaariota kutsutaan usein myös perusuraksi tai referenssiskenaarioksi. Ilmasto- ja energiastategiassa sekä KAISUssa perusura on nimetty WEM-skenaarioksi (With Existing Measures). Uudet politiikka- ja ohjaustoimet sisällytetään politiikkaskenaarioon, joka on nimetty WAM-skenaarioksi (With Additional Measures). WEM- ja WAM-skenaarioiden muodostusta ja niihin sisällytettyjä lähtöoletuksia on kuvattu tarkemmin luvussa 3.

WEM-skenaarion alustavia tuloksia esiteltiin sidosryhmille ja asiantuntijoille kaikille avoimessa virtuaalisessa tilaisuudessa 16.2.2021, joka keräsi yli sata osallistujaa. 11.6.2021 järjestettiin vastaava virtuaalinen avoin tilaisuus, jossa esiteltiin alustavia WAM-skenaarioiden tuloksia. Laskelmia ja niiden lähtökohtia päivitettiin ja täsmennettiin useaan kertaan saatujen kommenttien ja palautteen sekä WEM-kehitykseen liittyvän uuden tiedon pohjalta liittyen erityisesti liikenteen kehitykseen (ks. Luku 3.8). Lisäksi WAM-skenaarion muodostamisessa on huomioitu kesäkuussa 2021 julkaistuun Suomen ilmastolakiehdotukseen sisällytetyt kasvihuonekaasupäästötavoitteet vuosille 2030, 2040 ja 2050 sekä Euroopan komission ns. FitFor55 -säädösehdotuspaketissa esitetty taakanjakosektorin KHK-päästötavoite vuodelle 2030.

Tässä ja muissa HIISI-hankkeen raporteissa esitetyt laskennalliset analyysit olivat lisäksi hallituksen syyskuun 2021 budjettiriihen tausta-aineistona, jossa laadittiin ilmasto- ja energiapolitiittisia päätöksiä hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamiseksi. Näin ollen laskelmia laadittaessa ei ollut tietoa budjettiriihessä tehdyistä poliittisista päätöksistä, mutta skenaariolaskelmien vaikutusarvoista voidaan kuitenkin nähdä, minkälaisia vaikutuksia laskelmiin sisällytetyillä toimilla voisi olla.

Laskentamallien kuvaus sekä WEM- ja WAM-skenaarioiden yleisiä lähtökohtia on esitetty luvuissa 2 ja 3. Luvuissa 4 ja 5 on esitetty energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasupäästöjen kehitykset, joiden avulla voidaan tarkastella, mihin KHK-päästötasoon päästään nykytoimin ja oletettujen tiekennettujen tavoitteiden mukaisin politiikkatoimin. Raportin luvussa 6 on esitetty lopuksi johtopäätökset uusien politiikkatoimien vaikutuksista. Johtopäätösluvussa on esitetty myös KHK-päästöjen ja -poistumien kokonaistase, jonka avulla voidaan arvioida ns. ”päästökuilu” hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamiseksi vuoteen 2035 mennessä ja uusilla ohjaustoimilla tarvittavat päästövähennykset ja/tai LULUCF-sektorin nettonielun vahvistamisen tarpeen.

2 Menetelmät ja laskentamallien kuvaukset

2.1 Tarkasteluun käytetty energiajärjestelmämalli

Energiajärjestelmän mallinnuksessa ja analysoinnissa käytetty keskeinen työkalu on VTT:llä laadittu laaja pitkän aikavälin järjestelmämalli TIMES-VTT, joka perustuu kansainvälisessä IEA ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program) yhteistyössä kehitettyyn ETSAP-TIAM-malliin (Loulou 2008, Loulou & Labriet 2008), joka pohjautuu puolestaan IEA ETSAP TIMES-mallinnusjärjestelmään (Loulou ym. 2016). Mallissa on kuvattu Suomen, Pohjoismaiden ja muun Euroopan energiajärjestelmät. Menetelmällisesti malli on niin sanottu osittaisasapainomalli, joka maksimoi kuluttajien ja tuottajien yhteenlaskettua taloudellista ylijäämää. Malli sisältää varsin yksityiskohtaisen kuvauksen sekä energian tuotannon ja käytön nykyjärjestelmästä että tulevaisuuden teknologiavaihtoehtoista ja kattaa kaikkien Kioton pöytäkirjan kasvihuonekaasupäästöt. Yksinkertaistettu rakennekaavio on kuvassa 1.

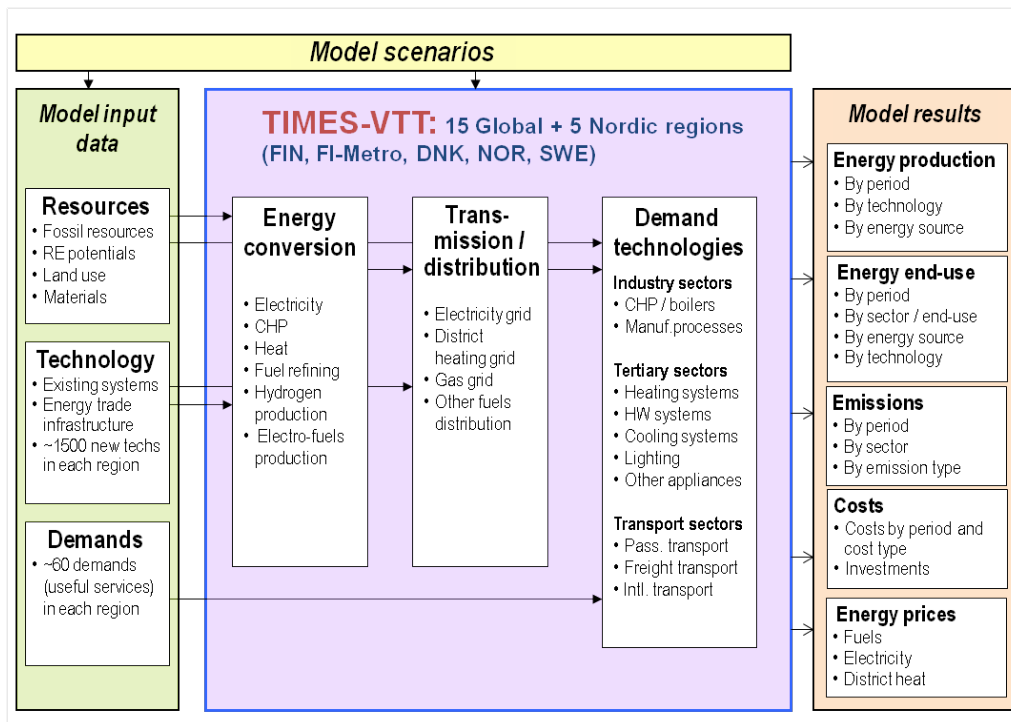
Mallin tietokanta sisältää yksityiskohtaisen kuvauksen energiajärjestelmästä mukaan lukien energiantuotanto ja -siirtojärjestelmä, rakennuskanta, asumisen ja palvelujen energian käyttökohteet, autokanta ja muu liikennevälinekanta, energiantensiivisten teollisuustuotteiden tuotantoprosessit ja -laitokset, muun teollisuuden energian loppukäyttökohteet sekä maa- ja metsätalouden energiakäyttö. Tietokannan laajin osa koostuu kuitenkin tulevaisuuden energiajärjestelmän investointivaihtoehtojen teknologiakuvauksista, mukaan lukien arviot niiden kustannusten ja teknisen suorituskyvyn kehityksistä (mm. hyötysuhteet, käyttöiät, käytettävyys- ja käyttökertoimet). 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 (esim. Koljonen & Lehtilä 2015, Lehtilä & Koljonen 2018).

TIMES-VTT-mallin laskennallisesti tuottamat energian kulutuksen ja KHK-päästöjen kehitysurat riippuvat lukuisista lähtötietoina annetuista tekijöistä. Keskeisiä mallin käyttämiä lähtötietoja ovat:

- talouden eri sektoreiden kehitys eli teollisuussektoreiden, kotitalouksien, palvelujen, maa- ja metsätalouden ja kaivannaisteollisuuden kehitykset;
- energiantensiivisen teollisuuden toimialojen eri tuotteiden tuotannon kehitykset;

- 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 uusiin investointeihin käytettävissä olevien teknologiavaihtoehtojen oletettu kehitys kaikilla sektoreilla sekä teknisten parametrien että kustannusten osalta.

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



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 tarvitta-

essa prosesseittain. Tulokset sisältävät myös muun muassa kaikkien mallissa kuvattujen tuotantolaitosten ja -tekniikoiden kapasiteetit, investointikustannukset ja käyttökustannukset. Malli tuottaa tuloksenaan myös energiahäydykkeiden hinnat, jotka edustavat pitkän aikavälin tasapainohintoja.

TIMES-VTT-mallin tarkasteluaikaväli 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 vuosilta 2010 ja 2017. Suomen osalta ne perustuvat Tilastokeskuksen IEA:lle toimittamiin tilastoihin, mutta ovat laskentatavaltaan hieman kansallisesta energiatilastoinnista poikkeavia.

Skenaariotyössä uusien tekniikoiden teknis-taloudelliset parametrit (kustannukset, hyötysuhteet) ja niiden kehitys perustuivat suurelta osin kansainvälisistä tutkimusjulkaisuista kerättyihin arvioihin, mutta laadukkaita kotimaisia, esimerkiksi VTT:llä tuotettuja teknologia-arvioita on tällöin luonnollisesti myös hyödynnetty mahdollisimman laajasti.

2.2 Liikenteen ALIISA-malli

ALIISA on VTT:n kehittämä deterministinen Suomen autokannan, suoritteiden ja kulutuksen laskentamalli. ALIISA laskee liikennekäytössä olevan autokannan kehityksen vuoteen 2050; autokantaan sisältyvät henkilöautot, pakettiautot, linja-autot ja kuorma-autot käyttövoimineen ja käyttöönottovuosineen. Kaksipyöräiset ja muut L-luokkaan kuuluvat kevyet ajoneuvot eivät sisälly malliin, vaan niiden laskenta on suoritettu erillisellä MP-LIISA-mallilla.

Autokannan muutokseen vaikuttaa ensirekisteröintien ja käytettynä maahantuotujen määrät, käyttövoima- ja ikäjakaumat sekä poistuma. Suorite ja kulutus lasketaan keskimääräisenä katu- ja maantieajon yhdistelmänä. Suoritteen määrään vaikuttaa autokannan määrä sekä vuosimallikohtaiset ajosuoritekertoimet. Kahdella tai useammalla käyttövoimalla liikkuville ajoneuvoille on määrätty osuudet eri käyttövoimilla ajetuille suoritteelle. Kulutuslaskennassa käytetään vuosittain päivitettäviä kulutuskertoimia edellisen inventaariovuoden todennettuihin polttoainemyynteihin pohjautuen. Polttoaineseosten kulutusten pohjalta mallissa iteroidaan bioperäisen polttoaineen osuus vastaamaan lain velvoittamaa biojakeluvolvoitteen määrää. Hiilidioksidipäästöt lasketaan olettaen, että biojakeluvolvoite toteutuu täysimääräisenä ja että biopoltoaineen fossiiliset hiilidioksidipäästöt ovat nolla. ALIISA-malli ei laske muita kasvihuonekaasupäästöjä, vaan niiden määrä arvioidaan VTT:n tieliikenteen päästölaskentamalli LIISA:sta saatavilla kertoimilla.

ALISA-malli tuottaa tuloksina aikasarjat ajosuoritteista, polttoaineiden kulutuksista ja hiilidioksidipäästöistä vuoteen 2050 asti. Tieliikenteen hiilidioksidipäästöihin vaikuttavat toimenpiteet otetaan huomioon vain niille vuosille, joille toimenpiteet on määrätty. Toimenpiteiden lisäksi malleihin sisältyy nykytilanteeseen pohjautuvat oletukset autokannan kehitymisestä lähinnä ensirekisteröintien käyttövoimaosuuksien kautta. Mallin laskema ajosuorite sopeutetaan sovittuun suorite-ennusteeseen valtakunnallisesti muuttamalla suoritekertoimia siten, että suorite-ennuste toteutuu täysimääräisenä. Kulutuskertoimiin sisältyy oletus energiatehokkuuden paranemiselle sekä polttomoottori- että sähkökäyttöisille ajoneuvoille. Oletuksiin tulevaisuuden kehityksestä sisältyy aina epävarmuuksia niin autokannan, ajosuoritteiden, energiankulutuksen että polttoaineseosten osalta.

2.3 Työkoneiden Tyko-malli

TYKO on VTT:n kehittämä deterministinen Suomen työkonekannan kulutuksen ja päästöjen laskentamalli. TYKO-malli laskee kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi joitakin ilman epäpuhtauspäästöjä (CO, HC, NO_x, SO₂) ja huomioi urean käytön aiheuttamat lisän CO₂-päästöön. TYKO-malli koostuu kolmesta alamallista, joissa mallinnetaan erikseen bensiini- ja dieselkäyttöiset työkoneet sekä traktorit. TYKO-mallin työkonekanta on jaettu eri työkoneityyppeihin ottaen huomioon tehojakaumat, moottoritekniikat ja Stage-luokat. TYKO-malli on suunniteltu nimenomaan polttomoottorikäyttöisten työkoneiden mallintamiseen ja ei sellaisenaan laske sähkökäyttöisten tai hybridityökoneiden kantaa.

TYKO-malli tuottaa tuloksina aikasarjat polttomoottorikäyttöisten työkoneiden kulutuksista ja hiilidioksidipäästöistä vuoteen 2040 asti. Työkonekannan muutoksia kuvaa työkoneiden vuosittaiset uusmyynnit ja poistumat, joista myynnit pohjautuvat aina uusimpaan tilastotietoon ja poistumat on määritelty asiantuntija-arviona. Myynnit ja poistumat oletetaan vakioksi tulevaisuusvuosille. Vuotuinen kulutus lasketaan kullekin työkoneeryhmälle työkonekannan koon, nimellistehon (kW), keskimääräisen kuormitusasteen sekä vuotuisten käyttötuntien mukaan. Päästökertoimet huomioivat moottorityypin, teholuokan, koneen iän ja Stage-luokituksen. Päästöt lasketaan laskennallisen kulutuksen pohjalta. Dieselkäyttöisille työkoneille on asetettu mallissa biojakeluvointe, joka toteutuu täysimääräisenä lain velvoitteen mukaisesti. Bensiinikäyttöisten työkoneiden oletetaan käyttävän tieliikenteeseen jaeltavaa bensiiniseosta, jossa bion osuus vastaa ALISA-mallissa käytettyä bensiiniseoksen bio-osuutta. Biopolttoaineiden fossiiliset hiilidioksidipäästöt oletetaan ALISA-mallin tavoin nollassi.

TYKO-mallin perusversion tuottama tulevaisuusennuste kuvaa vain nykytilanteen jatkumoa eikä ota kantaa ulkoisten tekijöiden aiheuttamiin muutoksiin työkonekannassa;

työkoneille ei oleteta myöskään energiatehokkuuden paranemista. TYKO-mallista kehitettiin toinen versio, jossa sähkökäyttöisten työkoneiden lisääntyvää määrää voidaan kuvata polttomoottorikäyttöisten työkoneiden vähentyvinä myyntimäärinä ja täten laskea sähkökäyttöisten työkoneiden aiheuttama muutos hiilidioksidipäästöihin. Myyntimäärien muutokset pohjautuivat aiemmin tehtyyn arvioon työkoneiden sähköistymisen etenemisestä Suomessa (Markkanen & Lauhkonen 2021).

2.4 Rakennuskannan FineBuild ja VTT-Build-mallit

Vuoteen 2020 mennessä valmistuneen rakennuskannan energialaskenta on tehty Korjausrakentamisen pitkän aikavälin strategian 2020–2050 valmistelun yhteydessä kehitetyllä FineBuild -mallilla (Kangas ym. 2020). Siinä lähtökohtana on ollut virallisten tilastojen osoittama talotyyppikohtainen lämmitysenergian kulutus lämmönlähteittäin ja polttoaineittain. Tämän ns. vanhan rakennuskannan energiankulutuksen kehityksessä on otettu huomioon poistuma, korjauksilla aikaansaattava energiatehokkuuden parantuminen, fossiilisten polttoaineiden korvaaminen muilla lämmönlähteillä sekä ilmaston lämpenemisestä johtuva lämmitystarpeen lasku.

Vuosien 2020–2050 uudisrakentamisen määrä on laskettu VTT Build -mallilla (Vainio, 2020), jossa alueellisista väestöennusteista on johdettu tuleva asuntokysynnän määrä ja rakenne. Uudisrakentamisen määrä on kysynnän ja tarjonnan välinen erotus. Palvelurakentaminen on sidottu alueelliseen asuntotuotantoon. Molemmissa malleissa talotyypit ovat omakotitalo, rivitalo, asuinkerrostalo ja palvelurakennus. Palvelurakennuksiin kuuluvat liikerakennukset, toimistorakennukset, liikenteen rakennukset, hoitoalan rakennukset, kokoontumisrakennukset ja opetusrakennukset. Lämmönlähteissä ja polttoaineissa lähtökohtana on ollut tuorein tilastotieto. Tulevaisuuden lämmitystapavalintoja on optimoitu TIMES-VTT -mallilla.

3 WEM- ja WAM-skenaarioiden kuvaukset

3.1 Yleiset lähtöoletukset

WEM- ja WAM-skenaarioiden lähtöoletukset on muodostettu yhteistyössä eri ministeriöiden edustajien ja ohjausryhmän jäsenten kanssa sekä HIISI-hankkeen tutkijoiden kesken. WEM-skenaariota on noudatettu lisäksi EU:n hallintomalliasetuksen (EC 2020) ohjeistusta päästöoikeuden hinnan ja fossiilisten tuontipolttoaineiden hintakehitysten osalta. Lisäksi on hyödynnetty toimialojen vähähiilitiekartta-aineistoa¹ ja HIISI-hankkeessa laadittua tiekartta-analyysiä².

WEM-skenaarioon sisällytetyt politiikka- ja ohjaustoimet noudattavat pitkälti edellisen energia- ja ilmastostrategian (TEM 2017) ja KAISU:n (YM 2017) WAM-skenaariota, joihin sisällytetyt toimet on jo toimeenpantu. Esimerkiksi kivihillen käytöstä luopuminen energiantuotannossa vuonna 2029 ja tieliikenteen bio-osuuden sekoitevelvoitteet ovat huomioitu WEM-skenaariossa. Yksi keskeinen määrittely WEM- ja WAM-skenaarioiden välillä onkin aikaraja, joka erottaa nykyiset ja uudet toimet.

HIISI-HANKKEEN WEM-SKENAARIOON ON SISÄLLYTETTY TOIMET JA PÄÄTÖKSET 31.12.2019 ASTI. NÄIN OLLEN KAIKKI HALLITUKSEN ILMASTO- JA ENERGIAPOLIITTISET PÄÄTÖKSET, JOTKA ON TEHTY 1.1.2020 ALKAEN³, MUTTA ENNEN 1.8.2021, ON HUOMIOITU WAM-SKENAARIOSSA.

Seuraavissa luvuissa 3.2-3.12 on esitelty WEM- ja WAM -skenaarioiden keskeisiä lähtöoletuksia. Luvussa 2 esitettyjen mallikuvausten yhteydessä on lisäksi esitetty lähteitä, joissa on kerrottu tarkemmin kunkin mallin käyttämistä tietoaineistosta tai -kannoista.

¹ Työ- ja elinkeinoministeriö, Vähähiiliset tiekartat 2035, aineistot saatavilla <https://tem.fi/tiekartat>

² HIISI-hankkeen tiekartta-analyysin laativat VTT ja Luke. Tiekarttasynteesistä on saatavilla videotallenne https://www.youtube.com/watch?v=THBxiZP_Teo

³ Liikenteen valmisteverojen 1.8.2020 voimaan tulleet veronkorotukset on päätetty jo ennen 31.12.2019, joten tämä ohjauskeino voisi sisältyä myös WEM:in sen määrittelyn mukaisesti.

3.2 Päästövähennystavoitteet ja päästöoikeuden hinnan kehitys

WEM-skenaarion taustalla ovat Suomen and EU:n asettamat ilmasto- ja energiapolitiittiset tavoitteet. EU:n vuodelle 2030 asettama KHK-päästövähennysten kokonaistavoite on 40 % vuoden 1990 KHK-päästötavoitteeseen verrattuna. Päästökauppasektoria ohjaa niin sanottu EU-tason päästökatto, mutta päästökaupan ulkopuoliselle, eli taakanjakosektorille, EU on asettanut sitovat päästövähennystavoitteet vuoteen 2030 mennessä. Suomelle nykyinen taakanjakosektorin tavoite on -39 % vuoden 2005 päästöihin verrattuna. Lisäksi Suomen nykyiseen ilmastolakiin on kirjattu -80 % päästötavoite vuoteen 2050 mennessä. Hiisi-tarkasteluissa keskeisin WEM-skenaarion KHK-päästötavoite kohdistui kuitenkin taakanjakosektorin 39 % tavoitteen saavuttamiseen, mukaan lukien liikenteen KHK-päästöjen puolitus vuoteen 2030 mennessä, joka oli sisällytetty vuoden 2017 KAISU:n tavoitteisiin. WEM-skenaarion osalta lähtökohdiana oli arvioida, kuinka hyvin taakanjakosektorin ja sen sisällä liikenteen KHK-päästötavoitteen saavuttamisessa todennäköisesti edetään 31.12.2019 mennessä toteutuilla ohjaukskeinoilla.

Toisin kuin WEM-skenaarion mallinnuksessa, WAM-skenaarion KHK-päästöille asetettiin vähennystavoitteet vuosille 2030, 2035, 2040 ja 2050. Vuosien 2030, 2040 ja 2050 tavoitteet perustuvat uuteen ilmastolakiehdotukseen (viite). Vuoden 2035 tavoite on hallitusohjelmaan kirjattu Suomen hiilineutraalisuustavoite, jolloin KHK-päästöjen ja LULUCF-sektorin nettonielujen tulee saavuttaa nettonollataso. Lisäksi vuodelle 2030 asetettiin tiukennettu taakanjakosektorin päästövähennystavoite perustuen Euroopan komission heinäkuussa julkaisemaan säädeehdotuspakettiin⁴ Alla on esitetty WAM-skenaarion KHK-kokonaispäästötavoitteet (vertailuvuosi 1990) ja taakanjakosektorin tavoite (vertailuvuosi 2005) sekä niiden perustelut:

- KHK-päästövähennys vähintään 60 % vuoteen 2030, jolloin päästöjä jää jäljelle korkeintaan 28 Mt CO₂-ekv.
- Hiilineutraalisuuden saavuttaminen vuoteen 2035. Tällöin päästöjä jää jäljelle korkeintaan 21 Mt CO₂-ekv. perustuen Luken WEM-arvioon LULUCF-sektorin nettonieluista vuonna 2035 (18 Mt CO₂-ekv.), joita vahvistetaan 3 Mt CO₂-ekv. hallituksen linjausten mukaisesti⁵
- Kokonaispäästövähennys vähintään 80 % vuoteen 2040 mennessä, jolloin päästöjä jää jäljelle korkeintaan 14 Mt CO₂-ekv.
- Kokonaispäästövähennys vähintään 90 %, mutta pyrkien tasoon 95 % vuoteen 2050 mennessä. Tällöin päästöjä jää jäljelle korkeintaan 7 Mt,

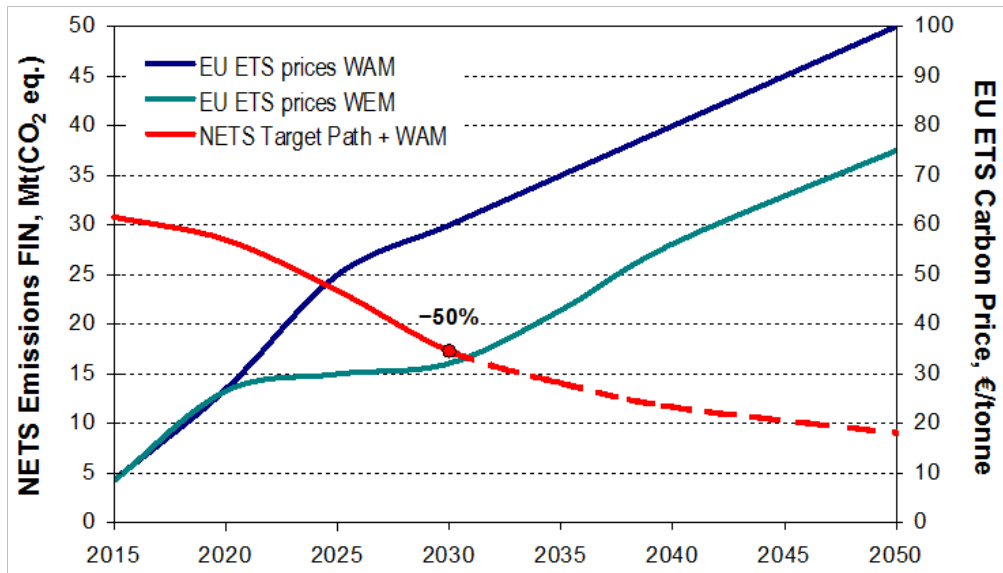
⁴ Ks. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en

⁵ Ks. <https://valtioneuvosto.fi/-/10616/hallitus-laati-tiekartan-hiilineutraaliin-suomeen-edellakavijyys-ilmastotoimissa-luo-mahdollisuuksia-koko-suomeen>

mutta pyrkien rajoittamaan päästöjen määrän korkeintaan tasolle 3,5 Mt CO₂-ekv.

- Taakanjakosektorin KHK-päästövähennys vähintään 50 % vuoteen 2030 mennessä. Vaikka vuoden 2030 jälkeisestä taakanjakosektorin tavoitteesta ei ole mitään tietoa, mallinnuksessa oletettiin tavoitteen hieman tiukkenevan 2030 jälkeen, mutta huomattavasti pienemmällä kulmaker-toimella kuin vuosina 2020 (16 %) – 2030 (50 %).

Kuva 2. Päästöoikeuksien hinnan kehitys ja taakanjakosektorin tavoitepolku.



Päästöoikeuden hintakehityksen oletukset WEM-skenaariossa perustuvat Euroopan komission mallinnuksen lähtöoletuksia koskeviin laskentaohjeisiin vuodelta 2020 (EC 2020). Päästöoikeuden hintakehitys on siten huomattavasti alhaisempi, kuin vuonna 2021 toteutuneet päästöoikeuden hintatasot. Tämän vuoksi WEM-skenaariolle laadittiin herkkyystarkastelu WEM-S, jossa päästöoikeuden hintakehitys huomattavasti korkeampi ja vastaa WAM-skenaariossa käytettyä päästöoikeuden hintakehitystä. WEM-S- ja WAM -skenaarioissa päästöoikeuden hinnan oletetaan nousevan 50 €/t CO₂ -hintatasosta 2020-luvulla 100 €/t CO₂ -hintatasoon vuoteen 2050 mennessä (Kuva 2). Kannattaa kuitenkin huomata, että päästöoikeuden hinnan kehitykseen liittyy merkittävää epävarmuutta. Syyskuussa 2021 päästöoikeuden hinta oli noussut jo yli 60 €/t CO₂ -tasolle⁶, joten nykytiedon perusteella WAM-skenaarioiden hintaoletuksia voidaan pitää varsin maltillisina.

⁶ EMBER, Daly Carbon Prices [Carbon Price Viewer - Ember \(ember-climate.org\)](https://ember-climate.org)

3.3 Politiikkatoimet WEM- ja WAM-skenaarioissa

3.3.1 WEM-skenaario

Tarkastellussa WEM-skenaariossa oletettiin keskeisimpinä nykyisinä politiikka- ja ohjaustoimina seuraavat:

- EU:n päästökauppajärjestelmä on voimassa koko tarkasteluaikavälin ajan ja lisäksi jako EU:n päästökauppa- ja taakanjakosektorien kesken perustuu nykyiseen jakoon;
- Vuoden 2019 lopussa olleiden valmisteverotasojen oletetaan pysyvän (reaalisesti) ennallaan;
- Kivihiilen käytöstä luopuminen sähkön ja lämmön tuotannossa viimeistään vuonna 2029;
- Turpeen käytön vähintään puolittaminen vuoteen 2030 mennessä. Tätä ei kuitenkaan asetettu lähtöoletukseksi mallinnuksessa, vaan tavoitteen toteutumisista on tarkasteltu mallinnuksen tulosten perusteella;
- Biopolttoaineiden osuus tieliikenteen energiankulutuksesta vuonna 2020 13,5 %:n energiasisältöosuudesta ja kasvaa vaiheittain 30 %:in vuoteen 2030 mennessä jakeluvuittelakia mukaillen (FINLEX 2019a). 10 %:n bionesteen sekoitusvelvoite rakennusten erillislämmityksessä käytettävälle kevyelle polttoöljylle ja työkoneiden dieselöljylle, joka kasvaa lineaarisesti vuosina 2020–2030 jakeluvuittelakia (FINLEX 2019b) mukaillen.
- Uudisrakentamisessa Suomessa on siirrytty lähes nollaenergiarakentamiseen EU:n yhteisten tavoitteiden mukaisesti (Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi 2010/31/EU, EPBD)
- Korjausrakentamisen energiatehokkuusvaatimukset (asetus 4/2013) sekä energiatehokkuuskorjauksiin osoitetun ARAn kautta jaettava tuen arvioidut vaikutukset ominaiskulutuksiin.
- F-kaasujen korvaaminen muilla aineilla EU:n direktiivien mukaisesti;
- Valtakunnallinen jätesuunnitelma jätteen synnyn ehkäisyn ja jätehuollon tavoitteista sekä toimista tavoitteiden saavuttamiseksi;
- 38 %:n uusiutuvan energian vähimmäisosuus energian loppukulutuksesta vuonna 2020 ja vastaavasti 51 %:n uusiutuvan energian vähimmäistavoite vuonna 2030. Uusiutuvan energian osuutta loppukulutuksessa ei kuitenkaan aseteta lähtöoletukseksi mallinnuksessa, vaan se on yksi mallinnuksen tulos.

Turpeen käytön puolitusta lukuun ottamatta WEM-skenaarion politiikkatoimet perustuvat jo vuoden 2017 energia- ja ilmastostrategiaan sekä KAISU:n. Turpeen käytön puolitus on kirjattu Sanna Marinin hallitusohjelmaan 2019 ja WEM-WAM -aikarajamäärit-

telyn vuoksi sisällytetty WEM-skenaarioon. Lisäksi kannattaa huomata, että kaikki TI-MES-VTT-mallinnuksessa käytetyt hinnat ovat reaalisia, jonka vuoksi myös kaikkiin energia- ja päästöveroihin ja -tukiin on sisäänrakennettuna indeksikorotus. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa ole päätetty, vaan verojen ja tukien reaalitasot tulisivat laskemaan ilman hallituksen päätöstä indeksi- tai muista korotuksista.

Päästöoikeuden hintakehityksen oletukset perustuvat Euroopan komission mallinnuksen lähtöoletuksia koskeviin laskentaohjeisiin vuodelta 2020 (EC 2020, Kuva 1). Päästöoikeuden hintakehitys on siten huomattavasti alhaisempi, kuin vuonna 2021 toteutuneet päästöoikeuden hintatasot.

Vaikka WEM-skenaariossa on käytetty vuoden 2019 energiaverotuksen tasoja, turpeen energiakäytön kehityksen osalta mallin lähtöoletuksissa on otettu huomioon verotuksen ja päästöoikeuksien hinnannoususta pääosin johtuva turpeen aktiivisen tuotantoalan ennakoitu nopea supistuminen lähivuosina. Bioenergia ry:n vuoden 2020 jäsenselvityksen perusteella tuotannossa oleva turvetuotantoala supistuisi vuoteen 2030 mennessä selvästi alle puoleen vuoden 2019 pinta-alamäärästä. Mallinnusta varten on myös kartoitettu monien turvetta käyttävien voimalaitosten suunnitelmia turpeen käytön vähentämiseksi tai siitä kokonaan luopumiseksi.

Nykyinen vuoden 2030 EU-tavoite Suomen taakanjakosektoreille (39 %:n vähennys vuoden 2005 tasosta) on sekin jo hyvän tovin ollut osa nykyisiä politiikkatavoitteita, mutta sitä ei otettu WEM-skenaarion mallinnuksessa huomioon, sillä skenaarion yksi nimenomaisista tarkoituksista oli tarkastella, kuinka hyvin tavoitteen saavuttamisessa todennäköisesti edetään jo toteutetuilla ohjaukeinoilla.

3.3.2 WAM-skenaario

Luvussa 3.2 esitettiin WAM-skenaarion KHK-päästötavoitteet vuosille 2030, 2035, 2040 ja 2050. TIMES-VTT-mallinnuksessa nämä tavoitteet saavutetaan, vaikka WAM-skenaarioon liitetyt ilmasto- ja energiapoliittiset uudet toimet eivät siihen mallinnuksen perusteella johtaisi. WAM-skenaariotarkasteluissa mallin laskema polku toteuttaa KHK-päästötavoitteet minimikustannuksin, eli mallinnuksessa toteutuu lisäinvestointeja päästötavoitteen saavuttamiseksi, vaikka muuten markkinaolosuhteet eivät olisi investoinneille suotuisat. WAM-skenaariossa on toisaalta oletettu toteutuvan merkittäviä infrastruktuurin muutoksia markkinaehtoisesti erityisesti energiaintensiivisessä teollisuudessa perustuen toimialojen vähähiilitekkarttoihin.

Tässä yhteydessä kannattaa huomata, että alla esitetyt WAM-skenaarion oletukset perustuvat hallituksen tekemiin päätöksiin 1.1.2020–1.8.2021 sekä joukkoon lisätoimia, joista ei ollut päätöksiä laskelmia laadittaessa. WAM-skenaariolle laadittiin lisäksi

joustomekanismeja koskeva herkkyy tarkastelu sekä myös jatkotarkasteluja hallituksen syyskuun 2021 budjettiriihen jälkeen. Jatkotarkasteluiden avulla voidaan hahmottaa, mitkä ovat jo tehtyjen päätösten mahdolliset vaikutukset KHK-päästöihin ja päästövähennyskustannuksiin. Näiden lisäksi yhdessä jatkotarkastelussa on arvioitu WAM-toimien vaikutuksia, joista ei ole päätöksiä olemassa. Alla on esitetty WAM-skenaarioon sisällytettyjä toimia ja oletuksia. Sulkuihin on lisätty huomio, onko kyseisestä ohjaustoimesta päätöksiä olemassa vai ei:

- EU:n päästökauppajärjestelmä on voimassa koko tarkasteluajavälin ajan ja lisäksi jako EU:n päästökauppa- ja taakanjakosektorien kesken perustuu nykyiseen jakoon (EU:n FitFor55-säädösehdotuspaketti sisältää useita mahdollisia muutosehdotuksia nykyiseen jakoon ja päästökaupan laajentamiseen, joita ei ole huomioitu HIISI-tarkasteluissa, koska EU-lainsäädännön uudistamiseen liittyy merkittävää epävarmuutta);
- Valmisteverojen oletetaan pysyvän reaalisesti ennallaan vuoden 2021 verotasossa (1.1.2021 lähtien voimassa olleet verotasot, liikennepolttoaineet mukaan lukien) vuoteen 2023 asti, jonka jälkeen kaikkia polttoaineiden valmisteveroja (liikennepolttoaineita lukuun ottamatta) nostetaan reaalisesti indeksikorotuksen verran vuodessa, eli käytännössä polttoaineiden valmisteverot nousisivat ”tuplaindeksin” verran;
- Sähkön käytön veroluokka II:n verotaso lasketaan voimassa olevan lainsäädännön mukaisesti suunnilleen EU-minimiin, 0,063 c/kWh v. 2021. Lisäksi II-veroluokkaan sisällytetään kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat konesalit, lämpöpumput ja sähkökattilat siirretään alempaan sähköveroluokkaan II (hallituksen päätökset olemassa).
- Energiaveropalautusten asteittainen poisto ennen vuotta 2025 ml. sähkön käytön valmisteverojen palautukset, lämmityspolttoaineiden valmisteverojen palautukset sekä maatalouden valmisteverojen palautukset (lainsäädäntö jo voimassa maatalouden valmisteverojen palautuksia lukuun ottamatta).
- Rakennusten erillislämmitykseen ja työkoneisiin käytettävän fossiilisen polttoaineen valmisteveron asteittainen korotus +3 €/MWh 2023, +3 €/MWh 2026 ja +4 €/MWh 2029 (yht. +10 €/MWh), joka korvaa em. tuplaindeksikorotuksen, kunnes tuplaindeksikorotus saavuttaa 10 €/MWh-tason (pätöksiä ei olemassa).
- Rakennusten energiatehokkuudelle oletettiin tiukennetut WAM-vaatimukset
- Nestemäisten biopolttoaineiden sekoitevelvoite liikenteessä vuoteen 2030 mennessä kuten WEM:ssä, mutta bio-osuutta kasvatetaan noin 2 TWh biokaasun avulla. Tämän vuoksi biokaasun liikennekäytölle kohdistetaan energiavero (pätöksiä ei olemassa).
- Rakennusten erillislämmityksessä käytettävälle kevyelle polttoöljylle ja työkonoiden dieselöljylle bio-osuuden sekoitevelvoite nostetaan 30 %:in vuoteen 2030 mennessä (pätöksiä ei olemassa).

- Mineraaliöljyn käytöstä luopuminen asuinrakennusten erillislämmityksessä vuoteen 2030 mennessä.
- Maatalouden WAM-toimet mallinnettuna Luken laatimien arvioiden pohjalta:
 - Turvemaiden viljely märkänä
 - Kivennäismaiden hiilensidonnän lisääminen
 - Tarkkuusviljely ja lypsylehmien metaanintuoton vähentäminen
- F-kaasujen korvaaminen muilla aineilla kiristyvien EU-direktiivien mukaisesti
- Liikenteessä LVM:n tiekartan tavoitteiden mukainen sähköistymisskenaario, jossa sähköhenkilöautojen vähimmäismääräksi asetetaan vuonna 2030 vähintään 700 000, joista valtaosan tulee olla täyssähköautoja (LVM 2020).

WAM-skenaariolle laadittiin lisäksi herkkyystarkasteluja, joista ensimmäinen koski joustomekanismien vaikutusta:

- WAM-S-skenaario: hyödynnetään ja käytetään one-off -jousto (päästöt vähennetään päästökauppasektorilla 0,7 Mt/a 2021–2030) ja LULUCF-jousto (päästöt vähennetään LULUCF-sektorilla 0,5 Mt/a 2026–2030). Joustot pienentävät suurimmillaan 1,3 Mt/a taakanjakosektorin päästövähennystarvetta.

Lisäksi laadittiin toisena, laajempaa herkkyystarkasteluna politiikkatoimien vaikutusten jatkotarkastelu käyttäen vertailukohtana WEM-skenaariion varianttia, jossa päästöoikeuden hinta on oletettu samaksi kuin WAM-skenaariossa. Lisätarkasteluissa ei siten asetettu vuosien 2030, 3035, 2040 ja 2050 KHK-päästötavoitteita mallinnuksen lähtökohdiksi, vaan lisälaskelmissa päästöoikeuden hinta ja oletukset politiikkatoimista ohjaavat KHK-päästökehitystä.

- WEM-S: vertailukohta, jossa päästöoikeuden hinta on oletettu samaksi kuin WAM-skenaariossa.
- WEM-S1: Jo laissa olevat energiaverotuksen tasot, joihin sisältyy myös sähkön käytön veroluokka II:n verotason laskeminen suunnilleen EU-miiniin, 0,063 c/kWh v. 2021. Lisäksi II-veroluokkaan sisällytetään kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat konesalit, lämpöpumput ja sähkökattilat siirretään alempaan sähköveroluokkaan II v. 2022. Energiaintensiivisten yritysten veropalautusten asteittainen poisto ennen vuotta 2025 ml. sähkön käytön valmisteverojen palautukset (2021) ja lämmityspolttoaineiden valmisteverojen palautukset (2021-2024). Työkone- ja lämmityspolttoaineiden energiasisältöveroa korotetaan 2,7 euroa megawattitunnilta (mukaan lukien CHP) ja yhdistetyn tuotannon verotukea pienennetään poistamalla 0,9-laskentasääntö.
- WEM-S2: Rakennusten erillislämmitys – tukitoimenpidekokonaisuus perustuen tehtyihin päätöksiin (ks. Honkatukia, 2021). Ei mallinnettu TIMES:lla erikseen, vaan oletukset öljylämmityksestä luopumiseen on huomioitu WEM-S3-skenaariossa.

- WEM-S3: Kevyen polttoöljyn, eli POK:n jakeluvaihteen nostaminen 30 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Vaikutukset arvioitu KHK-päästöihin erikseen työkoneiden, rakennusten erillislämmityksen ja muun POK:n käytön osalta.
- WEM-S4: Mahdolliset uudet verolinjaukset. WAM-skenaariossa oletettu maatalouden energiaveron palautus poistetaan. Korotetaan työkone- ja lämmityspolttoaineiden (huom. kaikki käyttö ml. teollisuus ja lämpölaitokset sekä rakennusten erillislämmitys) energiasisältöveroa 10 €/MWh (vrt. WAM-skenaario) pois lukien CHP:n verotusot.

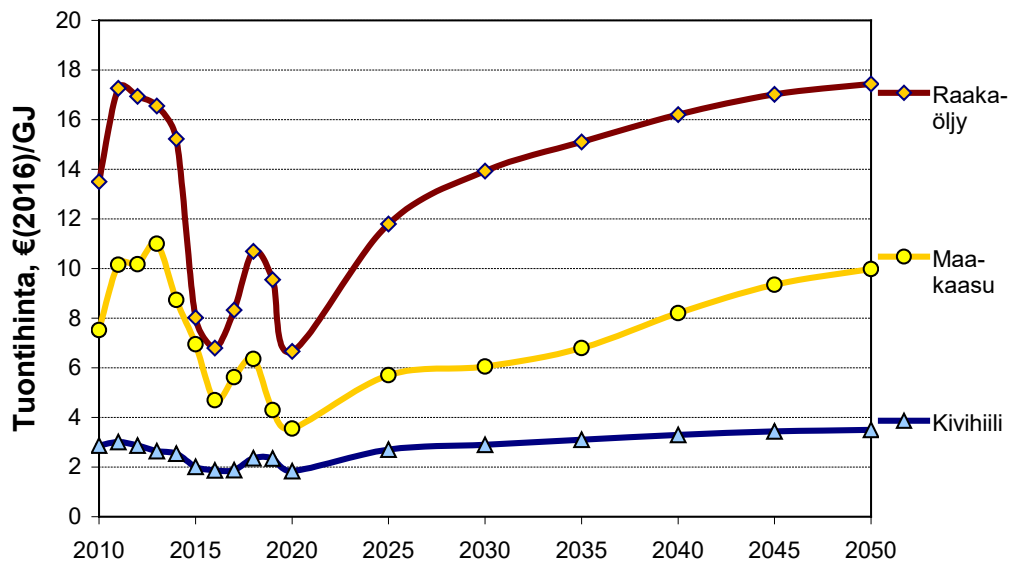
Uusiutuvan energian kasvutavoitteet ovat Suomessa kohdistuneet perinteisesti suurelta osin metsähakkeen käyttöön. Vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian perusskenaariossa (WEM) metsähakkeen käytön arvioitiin nousevan vuonna 2030 sähkön ja lämmön tuotannossa noin 14,5 milj. m³:iin eli 29 TWh:iin (TEM 2017). Tavoitteisiin pääsyn ohjauksena on ollut päästöoikeuden hinnan ja turpeen veron mukaan määräytyvä syöttötariffi, ja aiemmissa WEM-laskelmissa on yleensä oletettu tavoitteiden myös toteutuvan. Tarkastellussa WEM-skenaariossa tukea ei kuitenkaan lähtöoletusten mukaan maksettaisi enää 2020-luvulla, vaikka järjestelmä on ilmeisesti käytössä vielä kymmenen vuoden ajan. Nykyinen metsähakkeen käyttötaso onkin jäänyt melko kauas jälkeen aiemmista kansallisen uusiutuvan energian toimintasuunnitelman mukaisesta tavoitteesta, joka oli yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä erillisessä lämmöntuotannossa 25 TWh vuoteen 2020 mennessä. Konkreettisia tavoitteita ei myöskään enää otettu huomioon tarkasteltujen skenaarioiden politiikkatoimissa, vaan käytön tuleva kehitys on mallinnettu markkinaehtoisesti ja se on rajoitettu hakkuutähdehakkeeseen, harvennusten ainespuuksi huonosti sopivaan pienpuuhun sekä kantomurskeeseen.

3.4 Polttoaineiden hintojen kehitykset

Koska järjestelmämallissa on kuvattu kaikkien polttoaineiden tuotanto energiamineraalien primaarituotannosta lähtien sekä polttoaineiden markkinat, joissa hinta muodostuu kysynnän ja tarjonnan mukaan, mallissa ei itse asiassa varsinaisesti tarvita oletuksia polttoaineiden hinnoista. Mallin hintoja voidaan kuitenkin haluttaessa *kalibroida* muilla perusteilla laadittujen hintakehitysarvioiden mukaisiksi. HIISI-skenaarioiden mallinnuksessa on käytetty hyväksi uusimpia Euroopan komission ohjeistuksia oletuksista, joita suositellaan käytettävän polttoaineiden tuontihintojen ja päästöoikeuksien hintojen kehityksestä Euroopassa (EC 2020). Suositukset koskevat vain tärkeimpien fossiilisten polttoaineiden, raakaöljyn, maakaasun ja kivihillen hintojen kehitystä. Oletuksia on havainnollistettu kuvassa 2, josta voidaan nähdä arvioiden olevan

verraten maltillisia. Öljyn ja maakaasun hinnan arvioidaan nousevan reaalisesti takaisin vuosina 2011–2013 vallinneelle korkealle tasolle vuoteen 2050 mennessä. Kivihiilen hinnan arvioidaan puolestaan nousevan noin 3,5 €/GJ:n tasolle vuonna 2050. Eriytisesti maakaasun hinta pysyisi arvion mukaan selvästi vuosia 2011–2013 alhaisemalla tasolla aina vuoteen 2040 saakka.

Kuva 3. Fossiilisten polttoaineiden tuontihintojen kehitys EU:n ohjeistuksen mukaan (EC 2020).



Muiden kuin keskeisten fossiilisten polttoaineiden osalta EU:n komissio ei ole antanut vastaavia suosituksia, joten niiden osalta hintojen on annettu muodostua laskentamallissa endogeenisesti. Eri biopolttoaineiden primaariselle tuotannolle on mallissa tuotantokustannuskäyrät, jotka ovat niiden hinnanmuodostuksen pohjana. Keskeinen hintaan vaikuttava tekijä on biopolttoaineiden kysyntä, johon puolestaan vaikuttavat kaikkien kilpailevien energialähteiden hintojen kehitykset, energiaverotus, päästökauppa ja muut EU-tason ja kansalliset ohjaustoimet. Esimerkiksi päätökset luopua kivihiilen käytöstä energiantuotannossa vuoteen 2029 mennessä, turpeen käytön nopea väheneminen lämmöntuotannossa ja toisaalta päätökset korvata liikenteen, työkoneiden ja rakennusten öljylämmityksen fossiilisten polttoaineiden käyttöä kestäväillä biojalosteilla lisäävät bioenergiälähteiden kysyntää ja siten myös niiden hintaa.

Polttoaineiden hintaoletukset on pidetty samoina sekä WEM- että WAM-skenaariossa. Perinteisesti polttoaineiden maailmanmarkkinahintoja koskevat oletukset ovat olleet monissa selvityksissä myös herkkyytarkastelun kohteena, mutta vähähiiliskenaarioissa polttoaineiden hintaoletusten merkitys on tulosten kannalta oleellisesti monia

aiempia skenaariotarkasteluja vähäisempi, sillä nykynäkymin fossiilisten polttoaineiden poltosta joudutaan joka tapauksessa valtaosin luopumaan. Polttoaineiden kustannuksiin päästökauppasektorilla oleellisesti vaikuttavien päästöoikeuksien hintaoletukset olivat WAM-skenaariossa jo toteutuneen kehityksen mukaisesti selvästi WEM-skenaariota korkeammat (Kuva 3). Laskentamallin tuloksissa biopolttoaineiden hinnat nousivat erityisesti WAM-skenaariossa tuntuvasti nykyhintoja korkeammiksi, kun päästökaupan hintojen nousu parantaa bioenergian kilpailukykyä. Esimerkiksi metsähakkeen hinta oli Suomessa vuoden 2020 alussa noin 6,1 €/GJ käyttöpaikalle toimitettuna, ja tulosten mukainen vastaava hakkeen hinta asettuu WAM-skenaariossa noin 8,2 €/GJ:n tasolle vuonna 2030 (vuoden 2020 euroissa laskettuna, reaalihinnan nousu noin 35 %), vuonna 2025 hieman tätä korkeammaksikin. Biomassan hinnan nousu heijastuu luonnollisesti vastaavasti biopoltonesteiden tuotantoon siinä määrin kuin se perustuu biomassaraaka-aineisiin.

Biopolttoaineiden hintakehityksen osalta tulevaan kehitykseen liittyy melko suurta epävarmuutta, joka liittyy muun muassa biopolttoaineiden kestävyyskriteereiden tarkentumiseen EU-lainsäädännössä ja BECCS-teknologian hyödyntämiseen päästökaupan osana. Näitä epävarmuustekijöitä ei tässä työssä voitu laajemmin tarkastella.

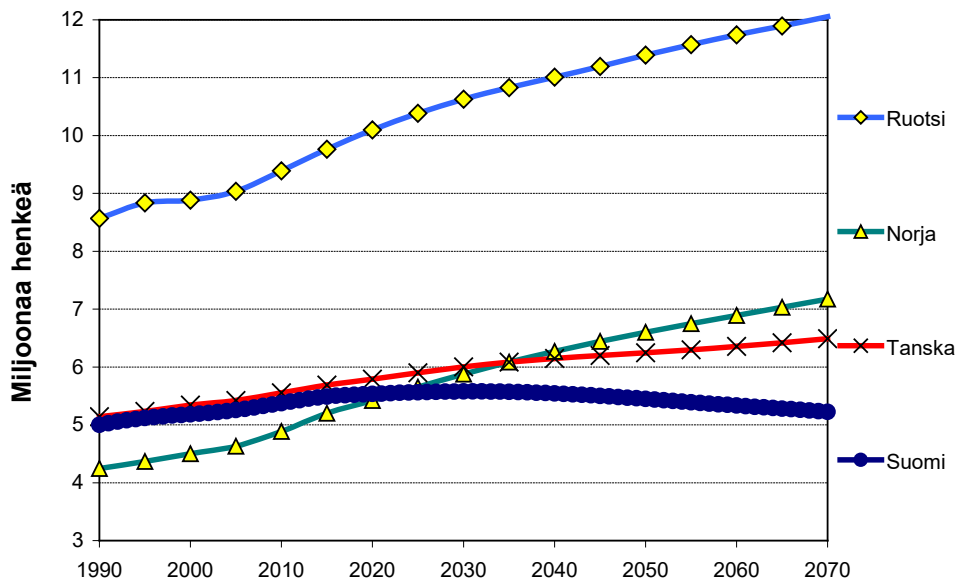
3.5 Väestön ja kansantalouden kehitykset

Tarkastelun pohjana on käytetty Tilastokeskuksen väestöennustetta vuodelta 2019, joka ennakoii Suomen väestön kasvavan hitaasti vielä vuoteen 2030 saakka, mutta kääntyvän laskuun sen jälkeen (Kuva 4). Ennustettu väestön kehitys poikkeaa siten verrattain selvästi muiden Pohjoismaiden arvioidusta väestönkehityksestä. Erityisesti Norjan ja Ruotsin väestön ennustetaan kasvavan melko tuntuvastikin vuoteen 2050 mennessä (SVT 2019, UN 2019). Vuonna 2070 Suomen väkiluku on ennusteen mukaan 5,2 miljoonaa eli noin 350 000 vähemmän kuin vuonna 2019. Työikäisiä arvioidaan Suomessa olevan jo vuoteen 2050 mennessä lähes 230 000 vähemmän kuin vuonna 2020.

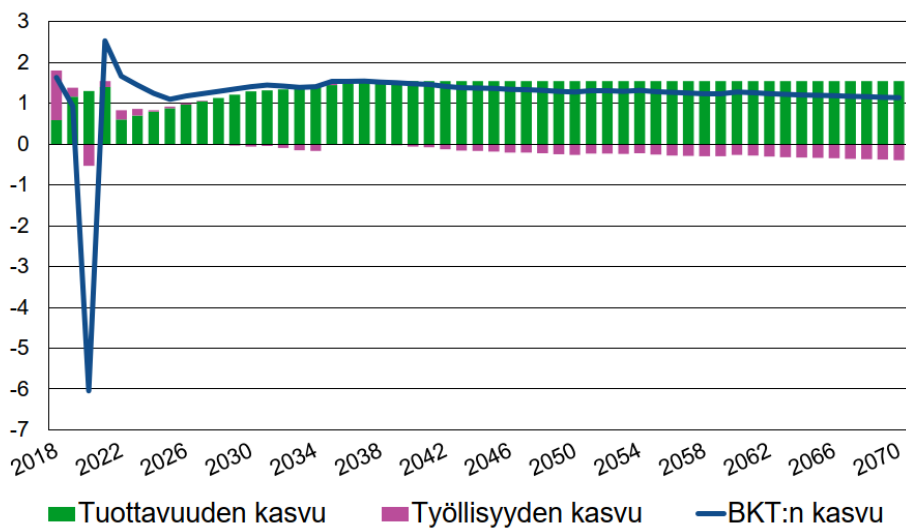
Väestön keski-ikäen noususta ja työvoiman supistumisesta seuraa, että työllisyyden kontribuutio talouskasvuun kääntyy negatiiviseksi 2040-luvulta alkaen (Kuva 5). Väestörakenteen muutos vaikuttaa talouden kasvuun työhön osallistumisen ja tuottavuuden kautta. Työikäisten määrän väheneminen hidastaa kasvua, kun työhön osallistuu aikaisempaa harvempi. Bruttokansantuote kasvaa siten tulevaisuudessa jokseenkin pelkästään työn tuottavuuden ansiosta, ja kasvu jää pitkällä aikavälillä maltilliseksi. Korkeampi talouskasvu olisi mahdollista, jos työn tuottavuus kehittyisi nopeammin tai työllisyysastetta onnistuttaisiin nostamaan arvioitua korkeammalle. Valtionvarainministeriön arvion mukaan näyttää kuitenkin epätodennäköiseltä, että tuottavuuskasvu

pitkällä aikavälillä juurikaan kiihtyisi. Julkisen talouden tulopohjan ja verotulojen en-
nustetaan siksi kasvavan huomattavasti hitaammin kuin väestön ikääntymisen vuoksi
kasvat julkisen talouden menopaineet (VM 2020).

Kuva 4. Väestön ennustettu kehitys neljässä Pohjoismaassa (UN 2019, TK2019).



Kuva 5. Bruttokansantuotteen kasvu osatekijöittäin (%) VM:n ennusteen mukaan (VM 2020).



3.6 Teollisuuden kehitys

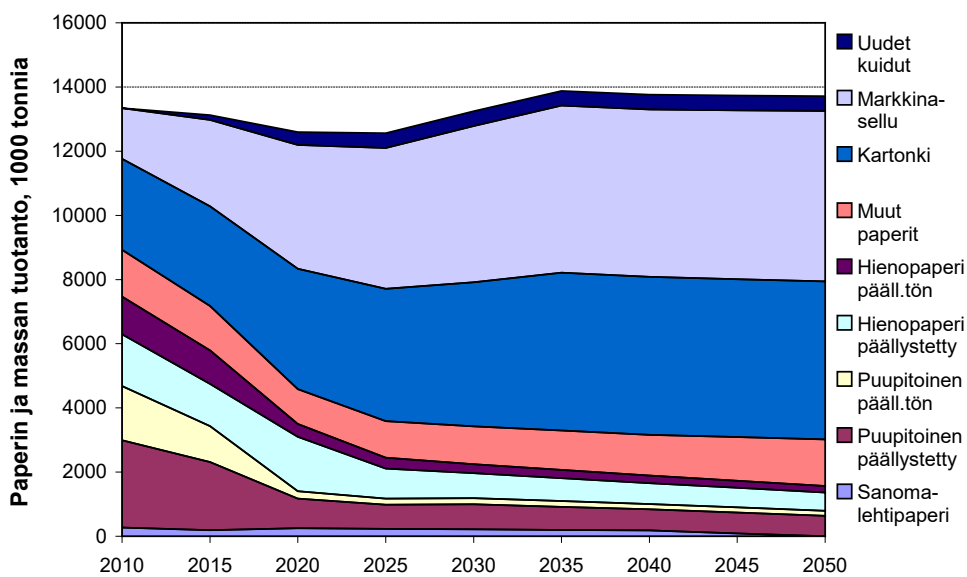
Metsäteollisuuden toimialat ovat Suomen kansantaloudessa keskeisiä sekä tuotokseen että energia- ja raaka-ainekäytöltään. Metsäteollisuuden kehitys on siten monessa suhteessa hyvin keskeinen tekijä Suomen energijärjestelmän ja sen päästöjen kannalta. Metsäteollisuustuotteiden tuotannon kehitys määrittää suurelta osin kotimaisten ainespuun hakkuumäärän tason ja vaikuttaa sitä kautta metsien hiilinielujen kehitykseen ja puubiomassan kokonaisenergiakäytön tasoon.

Metsäteollisuuden tuotannon kehitysarviot on laadittu työ- ja elinkeinoministeriössä yhteistyössä Luonnonvarakeskuksen (Luke) kanssa perustuen Luke:n tietolähteisiin ja analyyseihin (ks. Maanavilja ym. 2021). Lisäksi taustalla on käytetty Metsäteollisuus ry:n julkaisemaa ilmastotiekarttaa (Metsäteollisuus, 2020), Sahateollisuus ry:n hiilitiekarttaa (Sahateollisuus, 2020) ja Pöyryn (nykyinen AFRY) vuonna 2016 laatimaa selvitystä ”Suomen metsäteollisuus 2015-2035”. Pöyryn (2016) selvitystä käytettiin vuoden 2017 energia- ja ilmastostrategian laadinnassa (Koljonen ym. 2017). Yksi keskeinen tietolähde on AFRY:n (Pöyry 2020a) laatima taustaselvitys ”Tiekartta metsäteollisuudelle vähähiilistyvässä yhteiskunnassa, osa: päästöt”. Metsäteollisuuden ilmastotiekartan muita taustaselvityksiä on myös hyödynnetty. Arviot on pyritty muodostamaan siten, että ne heijastavat viimeisimpiä kehitystrendejä. Työssä käytetyt tuotannon kehitysarviot jäävätkin ainespuun käytön tarpeessa Metsäteollisuus ry:n vähähiilitiekartassa esitettyjen arvioiden alapuolelle. Mekaanisen metsäteollisuuden kehityksen osalta on hyödynnetty Sahateollisuus ry:n (Sahateollisuus ry 2020) arviota, joka oli myös alhaisempi kuin mitä Metsäteollisuus oletti omassa tiekartassaan. Tuontipuun osuus metsäteollisuuden ainespuun kokonaishankinnasta rajoitettiin skenaariossa viimeaikaisten vuosien tasolle. Raakapuun tuontiin ja vientiin sekä energiantuotantoon päätyvän hakkeen tuontiin liittyviä oletuksia on esitetty tarkemmin Luken laatimassa WEM-raportissa (Maanavilja ym. 2021).

Metsäteollisuuden tuotannon kehitysarviot eivät kovin paljon poikkea Pöyryn vuonna 2016 tekemistä perusarvioista (Pöyry 2016), mutta viime vuosien toteutuneen kehityksen mukaiset muutokset on luonnollisesti otettu arvioissa huomioon, samoin kuin tuotannon siirtymät painopapereista yhä voimakkaammin pakkausmateriaalien ja uusien kuitutuotteiden valmistukseen. Kuva 6 esittää massa- ja paperiteollisuuden tuotannon kehitysarvion. Mekaanisen jalostuksen osalta puolestaan arvioidaan tavanomaista sahatavaraa pidemmälle jalostettujen tuotteiden valmistuksen kasvavan tulevaisuudessa (laminoitu viilupuu eli LVL, puukomposiitit, liimalamellit jne.), joiden kehitysarvioita on kuvattu Luken WEM-raportissa (Maanavilja ym. 2021).

Sellun kokonaistuotanto kasvaa WEM-skenaariossa vuodesta 2019 noin 1,2 milj. tonnia vuoteen 2030 mennessä ja yli 1,7 milj. tonnia vuoteen 2035 mennessä. Yhä suurempi osa sellusta oletetaan myytävän markkinamassana tai siitä jatkojalostettuina uusina kuitutuotteina Suomen ulkopuolelle, kun taas kotimaiseen paperin ja kartongin valmistukseen käytetyn sellun yhteismäärä pysyy lähes ennallaan.

Kuva 6. Paperin ja massan tuotannon kehitys tuoteryhmittäin (WEM ja WAM).



Metsäteollisuuden tuotteiden tuotantomääriä on esitetty myös Luken HIISI-WEM-raportissa (Maanavilja ym. 2021), jossa on kuvattu maankäyttö- ja maataloussektorin WEM-kehitys. Uusien metsäteollisuuden tuotteiden osalta on arvioitu selluloosapohjaisen tekstiilikuidun tuotantomäärien kehitystä sekä investointeja biotuotetehtaisiin, jotka valmistavat nestemäisiä biojalosteita, biomuoveja ja/tai biokemikaaleja. Tekstiilikuitujen osalta on oletettu 400 kt kapasiteetin lisäys nykytasoon verrattuna. Biojalosteiden, biomuovien ja biokemikaalien osalta on oletettu, että näitä tuotetaan lähinnä mäntyöljystä, joka on metsäteollisuuden sivutuote ja on siten riippuvainen oletetuista metsäteollisuuden kapasiteetin kehityksistä. Lisäksi skenaarioissa on huomioitu 200 kt mäntyöljytislaamoinvestointi Haminaan, jonka biojalosteiden tuotannon on oletettu pohjautuvan mäntyöljyn tuontiin, sekä Haapaveden biojalostamo, jonka on arvioitu käyttävän puuraaka-ainetta 700 000 kuutiometriä vuodessa. Oletukset metsäteollisuuden kehityksestä ovat valtaosin samat WEM- ja WAM-skenaarioissa.

Perusmetallien tuotannon kehitysarvioiden osalta WEM-skenaario on varsin samankaltainen kuin vuoden 2017 energia- ja ilmastostrategiassa käytetyt arviot (Koljonen

ym. 2017). Teknologiateollisuuden vähähiilitiekartassa esitettiin ainoastaan karkea arvio noin 0,5 %:n vuosittaisesta perusmetallien tuotannon volyymikasvusta (Pöyry 2020). Terästeollisuuden osalta maltillinen kasvu on suunnattu laskentamallissa ruostumattoman teräksen valmistukseen, kun taas hiiliteräksen valmistuksen on oletettu pysyvän nykyisen kapasiteetin mukaisissa puitteissa. Teknologiateollisuuden nopeutetun teknologisen kehityksen edellyttämiä prosessimuutoksia (muun muassa vetypelkistykseen käyttöönotto) on otettu huomioon WAM-skenaariossa.

Koko energijärjestelmän sähköistyminen ja siirtyminen globaalisti puhtaaseen energiaan luovat kasvavaa kysyntää erityisesti ruostumattoman teräksen tuotteille, joten siltä osin ruostumattoman teräksen ja sen raaka-aineena käytettävän ferrokromin tuotannon oletettu kasvu lienee perusteltu. Masuuniteräksen ja sen korvaajaksi hahmotellun suorapelkistysteräksen tuotanto pysyy oletusten mukaan korkeintaan noin 3 milj. tonnissa. Uutta täysin romuteräkseseen perustuvan sähköteräksen tuotantoa ei oletettu syntyvän Suomeen merkittävässä määrin tulevina vuosikymmeninä.

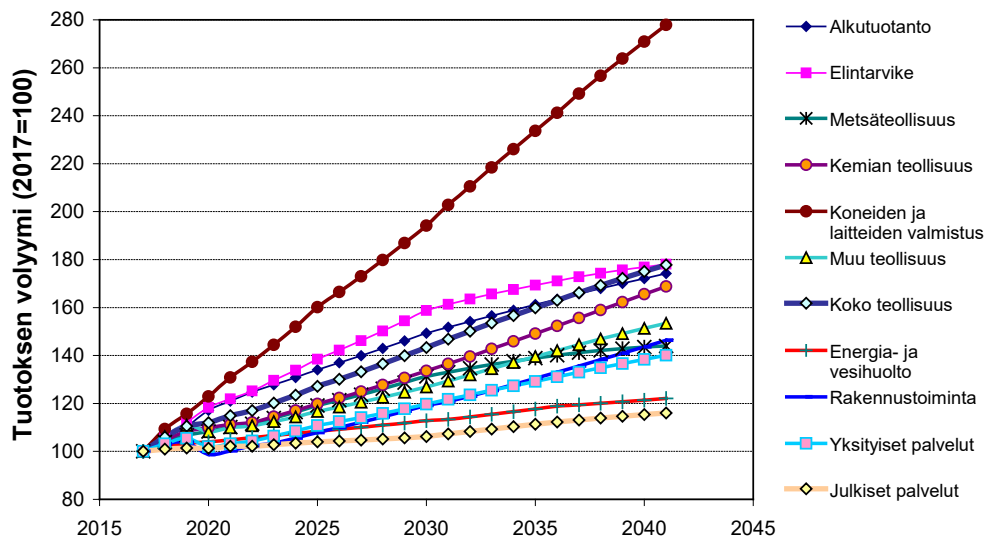
Niin sanottujen värimetallien tuotannon ja jalostuksen on myös oletettu kasvavan vain hitaasti, viime vuosien kehitystä mukailien, mikä on sopusoinnussa Teknologiateollisuuden tiekartan oletusten kanssa. Energian kulutuksen kannalta merkittäviä ovat muun muassa kuparin, sinkin ja nikkelin jalostus. Värimetallien valmistuksen sähkön ja polttoaineiden kulutus on pysynyt vuosina 2010–2019 suunnilleen samalla tasolla, joista sähkön kulutus on ollut vajaat 2 TWh (TK 2021).

Muun teollisuuden osalta skenaarioiden TIMES-mallinnuksessa on hyödynnetty FINAGE-mallilla tuotetun ENKO-perusskenaarion tuloksia eri teollisuudenalojen tuotoksen kehityksestä vuodesta 2017 vuoteen 2041 (Honkatukia 2021). Kehitysarvioiden havainnollistamiseksi tuotoksen aggregoituja kasvukäyriä on esitetty kuvassa 7. Kun fyysikaalisia tuotantomääriä ei ole voitu useimmilla teollisuudenaloilla tuotteiden monenkirjaisuuden vuoksi mallintaa, tuotoksen volyymien käyttö on tuotannon kasvun mallintamisessa perustellumpi lähtökohta kuin vaikkapa jalostusarvon käyttö, koska tuotos on suoraan verrannollinen tuotantomääriin, joka puolestaan on keskeinen lähtötieto energia- ja päästötaseen laskemisissa.

Tuotosarvioista nähdään koko teollisuuden painotetun tuotoksen kasvun ennustetun selvästi palvelusektoria suuremmaksi. Nopeimmin ENKO-perusskenaarion mukaan tulee kasvamaan koneiden ja laitteiden valmistuksen tuotos (yli 250 %), kun taas energiaintensiivisimmistä teollisuudenaloista esimerkiksi metsäteollisuudessa kasvu jää runsaaseen 40 %:iin, kemianteollisuudessa 68 %:iin ja ei-metallisten mineraalien valmistuksessa noin 90 %:iin. Tuloksista nähdään selvästi myös julkisten palvelujen (julkishallinnon lisäksi koulutuksen sekä terveys- ja hoivapalvelujen tuotanto) tuotoksen kasvuvaikutuksen pienuus muihin sektoreihin verrattuna.

Vaikka on huomattava, että ENKO-perusskenaarion tuotoksen kasvulukuja ei aivan sellaisenaan toki ole voitu käyttää mallinnuksessa perustuen FINAGE- ja TIMES-VTT -mallien eri lähestymistapoihin, skenaarioissa arvioitu teollisuuden eri toimialojen välinen rakennemuutos energiapalvelujen kysyntäarvioissa pohjautuu suurelta osin ENKO-kasvulukuihin. Poikkeuksena ovat keskeiset energiantensiiviset teollisuudenalat, kuten edellä mainitut metsäteollisuuden ja perusmetallien valmistuksen sektorit sekä muun muassa sementin ja kalkin valmistus, joilla on mallinnettu keskeisten tuoteryhmien fysikaaliset tuotantomäärät.

Kuva 7. Tuotoksen kasvun perusura sektoreittain FINAGE-mallin ENKO-perusskenaarion tulosten mukaan.



3.7 Maatalouden kehitys

Maataloutta koskevat tärkeimmät lähtöoletukset koskevat karjatalouden eläinmäärien, viljelyalan ja viljasadon sekä eloperäisten turvepeltojen alan ja päästöjen kehitystä. Luke (Maanvilja ym. 2021) toimitti energijärjestelmätason mallinnustyötä varten näistä lähtötietoina kaikki muut osiot paitsi turvepeltojen pinta-alan kehityksen, jonka oletettiin noudattavan päästöjen kehitystä. Suomen maatalouden tuotannolle, kotieläinten lukumäärille ja pellonkäytölle Luke tuotti kysyntäperusteisten skenaarioiden mukaiset kehitysarviot Dremfia-sektorimallin avulla (Lehtonen et al. 2020).

Dremfia-malli on osittaistasapainomalli, jonka perusoletuksena on hyötyä maksimoiva kuluttaja ja voittoa maksimoiva viljelijä. Mallissa on kuvattu melko tarkasti muun muassa maatalouden tukijärjestelmä, satotasot, peltoresurssit, ja eläinten rehunkäyttö suuralueittain ja tukialueittain. Kotimainen tuotanto ja tuonti kilpailevat keskenään kotimaisen kokonaiskulutuksen kattamiseksi, olettaen kotimainen tuote ja vastaava ulkomainen tuote epätäydellisiksi substituuteiksi, joilla voi olla eri hinnat (ns. Armington-oletus). Erityistä huomiota Dremfia-mallissa on kiinnitetty tuotantopanosten käyttöön eri tuotteissa sekä kunkin panoksen käyttömääriin maatalouden kokonaistasolla, jolloin malli on voitu validoida maatalouden kokonaislaskelman keskeisten panosten kokonaisarvoa vastaavaksi, ja tilastolähteistä saatujen panoshintojen avulla maataloustuotannon kehitysurat on voitu kalibroida yhteneväisiksi todellisen kehityksen kanssa (Lehtonen et al. 2017).

Arvioiden mukaan maatalouden tuotannon muutokset ovat vuoteen 2030 mennessä melko pieniä WEM-skenaariossa. Vuoteen 2050 mennessä naudan- ja sianlihan sekä maidon tuotannot vähenevät nykytasosta karkeasti noin 10 % noudattaen laskevaa nykytrendiä. Alhainen väestönkehitys tarkoittaa sitä, että kaikkien elintarvikkeiden kotimainen kysyntä ei juuri kasva vuoteen 2030 mennessä, kun elintarvikkeiden kulutuksen henkilöä kohden oletetaan pysyvän ennallaan. Myös siipikarjanlihan kulutuksen kasvu, joka on pysynyt 2000-luvulla voimakkaana, tulisi oletusten mukaan pysähtymään. Vuonna 2018 siipikarjanlihan kotimainen tuotanto oli likimain saman suuruinen kuin kulutus. Keskeisiä maatalouden WEM-oletuksia ovat:

- Kustannusnousu kasvintuotannossa vähentää viljan viljelyalaa noin 10 % (100 kha) ja tuotantoa alle 10 %
- Tuotantonurmien ala (noin 700 kha) pienenee 60–80 kha, satoa pienemmältä alalta (syyinä kustannukset, parempi tehokkuus)
- Kesantoala lisääntyy 300-400 kha:n tasolle, josta osa kiertävää, osa pysyvää huonoille peltoaloille. Vain vähän peltoalaa pois tuotannosta vuoteen 2040
- Maidontuotannon hidus väheneminen Etelä-Suomessa jatkuu eikä täysin kompensoidu tuotannon kasvulla muualla Suomessa: Kokonaistuotanto -7 % 2019–2050 (-5 % 2019–2040)
- Naudanlihantuotanto (87 Mkg 2019) vähenee 73 Mkg:aan vuoteen 2040 (70 Mkg 2050), sianlihantuotanto (170 Mkg 2019) vähenee 156 Mkg:aan vuoteen 2040 ja 152 Mkg:aan vuoteen 2050, siipikarjanlihantuotanto pysyy ennallaan (140–145 Mkg)

Taulukko 1. Maatalouden eläinmäärien, viljelyalan ja päästöjen kehitysarviot, WEM ja WAM.

Tuotantoindeksi – WEM	yks.	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lypsylehmät	1000	285	260	239	228	214	204	191	187
Muut naudat	1000	622	579	553	527	514	499	487	481
Siat	1000	1243	1083	1015	984	962	952	943	935
Siipikarja	1000	15254	16945	16907	16709	16784	16678	16729	16699
Viljelyala	1000	1997	2060	1964	1909	1858	1827	1805	1816
KHK-päästöt – WEM	yks.	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CH4 ruuansulatus	Gg	84.6	82.5	78.9	77.0	74.9	73.3	71.3	70.9
CH4 lanta	Gg	18.5	18.3	17.7	17.7	17.2	16.8	16.4	16.3
CH4 kulutus	Gg	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
N2O lanta	Gg	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
N2O lannoitteet	Gg	6.6	6.4	6.5	6.6	6.6	6.5	6.3	6.4
N2O eloperäiset turvemaat	Gg	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.7
CO2 kalkitus ja urea	Gg	182	200	200	200	200	200	200	200
Yhteensä, CO2-ekv.	Gg	6408	6336	6279	6258	6196	6141	6036	6045
Tuotantoindeksi – WAM	yks.	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lypsylehmät	1000	285	260	238	231	219	207	197	196
Muut naudat	1000	622	579	559	530	518	505	493	482
Siat	1000	1243	1083	1010	984	967	957	949	943
Siipikarja	1000	15254	16945	16877	16687	16782	16706	16722	16689
Viljelyala	1000	1997	2060	1956	1903	1859	1841	1840	1840
KHK-päästöt – WAM	yks.	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CH4 ruuansulatus	Gg	84.6	82.5	77.2	73.6	72.1	70.4	68.9	68.7
CH4 lanta	Gg	18.5	18.3	17.7	17.8	17.4	17.0	16.7	16.7
CH4 kulutus	Gg	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N2O lanta	Gg	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
N2O lannoitteet	Gg	6.6	6.4	6.4	6.2	6.2	6.0	5.9	6.0
N2O eloperäiset turvemaat	Gg	5.1	5.2	5.2	4.9	4.5	4.2	3.9	3.6
CO2 kalkitus ja urea	Gg	182	200	200	200	200	200	200	200
Yhteensä, CO2-ekv.	Gg	6408	6339	6153	5920	5769	5570	5403	5318

Mallinnuksessa käytetyssä TIMES-VTT-mallissa on kalibroitu maatalouden kuvaus Lukelta saatujen lähtötietojen avulla. Vaikka maatalouden kehitysarviot on mallinnettu Luken lähtötietojen mukaan, laskentamalli voi myös optimoinnin tuloksena vähentää päästöjä mallissa kuvatulla teknisillä päästöjen vähennystoimilla, mikäli se on kunkin skenaarion mukaisten määrittelyiden mukaan taloudellisesti kannattavaa. Biokaasun oletetun liikennepolttoainekysynnän kasvun vuoksi investoinneilla biokaasutukseen perustuvaan lannankäsittelyyn on jonkin verran kustannustehokasta potentiaalia lisäpäästövähennyksiin. Keskeiset lähtöoletukset eläinmäärien kehityksestä ja viljelyalasta (pl. kesanto) sekä KHK-päästöjen laskennallinen kehitys on esitetty taulukossa 1.

3.8 Liikennesektorin kehitys

3.8.1 Liikennesuoritteiden kysynnän kehitys

Tieliikenteen suoritteiden osalta käytössä oli touko-kesäkuussa Traficomien johtaman työryhmän laatima uusi tieliikenteen valtakunnallinen ennuste. Se perustuu samaan ennustemenetelmään, jolla edellinen vuonna 2018 Liikennevirastossa laadittu tieliikenteen ennuste (Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, 57/2018) laadittiin. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan päivitetty muiden liikennemuotojen ennusteita vaan päivitys tehtiin ainoastaan tieliikenteen osalta. Seuraavassa lyhyt kuvaus päivityksen pääperiaatteista ja toteutuksesta.

Vuoden 2018 valtakunnallisen liikenne-ennusteen taustalla oli useita toimintaympäristön tekijöitä, joiden kehityksestä arviot ovat muuttuneet vuoden 2018 jälkeen, kuten mm. väestön ja bruttokansantuotteen kehitys. Väestöennusteiden osalta liikenteen kannalta merkittävää on aiempia ennusteita voimakkaampi kaupungistumiskehitys ja työikäisen väestön määrän supistuminen sekä vanhushuoltosuhteen heikkeneminen, jolloin talouden kasvupotentiaali jää sen aikaista arviota pienemmäksi.

Henkilöliikenteen kasvu arvioitiin tässä päivityksessä menetelmällä, jossa suomalaisten liikkumista kuvattiin toimintaympäristön eri tekijöiden pohjalta erilaisten talouden ja liikkumiskäyttäytymistä kuvaavien mallien avulla. Yksilöiden tasolla tarkasteltiin mm. liikkumistarpeita ja -mahdollisuuksia sekä matkojen suuntautumisen, kulutavan valinnan ja myös reittien sijoittumisen suhteen.

Erityiseksi haasteeksi henkilöautoliikenteen ennusteen päivitykselle nousi sähköautojen määrän voimakas kasvu. Työryhmä päätyi oletamaan, että Suomessa on 600 000 täyssähköautoa tai ladattavaa hybridiä vuonna 2030, vuoden 2018 ennusteen oletettaman 120 000 kappaleen sijasta. Siksi päivityksessä menetelmää kehitettiin edelleen ottamaan mallin joustomekanismeissa koko autokannan tasolla paremmin huomioon eri ajokustannustasot. Näin suoritteiden ja päästöjen laskenta saatiin aiempaa realistisemmaksi.

Tavaraliikenteen ennuste perustui talouskehitykseen sekä tuotannon määrään ja jalostusarvoon. Eri toimialojen kuljetusintensiteetit (eli kuljetettujen tonnikipometrien suhde jalostusarvoon) määritettiin aiempien vuosien tuotantomääristä ja kuljetussuoritteista käytettävissä olleiden tietojen perusteella toimialakohtaisesti. Teollisuustoimialojen kuljetukset kattavat noin kolme neljännestä ennusteen tavaraliikenteen suoritteesta. Muiden kuin teollisuustoimialojen suorite laskettiin niin ikään talouskehityksen pohjalta. Tonnimääräisten kuljetussuoritteiden muuttaminen ajoneuvosuoritteiksi on tehty käyttäen keskimääräisiä kuormakokoja.

Päivitetystä ennusteesta on ennen vuotta 2030 vähemmän suoritteita kuin vuoden 2018 ennusteesta, erityisesti hitaamman talouden kasvuoletuksen takia, ja vuoden 2030 jälkeen enemmän suoritteita johtuen erityisesti kaupungistumisesta ja autokannan voimakkaan sähköistymisen aiheuttamasta ajokustannustason laskusta. Suoritteiden kasvu kohdistuu erityisesti sähköä käyttövoimana hyödyntävään ajoneuvokantaan ja polttomoottoriajoneuvojen suoritteet laskivat huomattavasti vuoden 2018 ennusteesta. Henkilöautojen kokonaissuorite kasvaa päivitetystä ennusteesta noin 12 % vuosien 2017 ... 2019 tasosta.

Covid-19 pandemian aiheuttamaa, noin 7 % havaittua alenemaa tieliikenteen suorite-tasoon pidettiin lyhytaikaisena, eikä sen aiheuttamia mahdollisia pitkäaikaista vaikutusta tieliikenteen tasoon arvioitu muuten kuin talousennusteessa toimialakohtaisten rajoitusten ja vientikysynnän muutoksien kautta. Ennustetta tulee kuitenkin uudelleen päivittää, kun talouden vähitellen toipuu pandemiasta, ja velkasuhteen kasvua aletaan hillitä hallituskauden lopulla.

Taulukko 2. WEM- ja WAM-skenaarioiden mukaiset ajosuoritteet ajoneuvoluokittain Mkm/a.

Suoritteet	2020	WEM		WAM	
		2030	2045	2030	2045
Henkilöautot	39 100	46 000	54 500	40 800	40 800
Pakettiautot	5 700	6 000	6 500	6 000	6 400
Linja-autot	500	500	500	500	500
Kuorma-autot, ip	1 500	1 600	1 500	1 600	1 500
Kuorma-autot, peräv.	1 800	2 000	1 900	1 900	1 900

3.8.2 Ajoneuvokannan ja -tekniikan kehitys

Suomen ajoneuvokannan ei WEM (eikä WAM) -skenaarioissa oleteta merkittävästi kasvavan nykyisestä. Henkilöautoja oletetaan olevan vuonna 2030 noin 4 % nykyistä enemmän, ja vuoteen 2045 mennessä noin 10 % enemmän. Mikäli ennustettu henkilöautosuoritteiden kasvu realisoituu, tämä merkitsee autokohtaisen keski-suoritteiden lievää kasvamista. Raskaassa kuljetuskalustossa vastaavat luvut ovat +10 % ja +20 %. Mikä vastaa suurin piirtein ennakoitua ajoneuvosuoritteiden kasvua.

Käyttövoimissa ja etenkin henkilöautojen teknologiassa on meneillään vahva murros, kun sähkön käyttö valtaa alaa aiemmalta, polttoaineisiin ja polttomoottoreihin perustu-

valta käyttövoima- ja voimalaiteratkaisulta. Tällä on perustavaa laatua olevia seurannaisvaikutuksia, koska sähköä käyttäville ajoneuvoille tulee rakentaa riittävä latausverkosto, ja lataamisen ohjaus tulee ottaa osaksi sähköverkon ohjausta, jotta vältetään tarpeettomilta tehopiikeiltä. Sähkön kokonaiskäyttöön liikenteellä ei kuitenkaan vielä ole yhtä merkittävää vaikutusta, sillä 2030 arvioitu sähkön liikennekäyttö on noin 2,5 TWh, vastaten vasta alle 10 % osuutta koko tieliikenteen yhteen lasketusta energian käytöstä, mutta ainakin kaksinkertaistuu sitä seuraavan vuosikymmenen kuluessa.

WEM-skenaarion viimeisimmän päivityksen mukaan oletetaan sähköä käyttävien autojen (täyssähkö- ja ladattavien hybridien) yhteen lasketun kannan nousevan noin 600 000 autoon, mikä on vähän yli 20 % kaikista henkilöautoista. Arvio perustuu pääasiassa kolmen viime vuoden positiiviseen markkinakehitykseen, jota tukee autoteollisuuden kommunikoima voimakas panostus sekä sähköautojen teknologiaan että valmistuskapasiteettiin. Pakettiautoissa sähköistyminen ei ole edennyt yhtä nopeasti, ja ladattavien autojen markkinaosuuden oletetaan olevan vain noin puolet henkilöautojen vastaavista lukemista. Näin siksi, että Suomessa myytävät pakettiautot ovat keskimääräistä suurempia, ja meiltä puuttuu lähes kokonaan pienempiin henkilöautoihin perustuva segmentti, joissa sähköistyminen yleistyy ensimmäisenä. Sähkökäyttöisiä pautoja oletetaan WEM-skenaariossa olevan vajaat 25 000 kpl.

Toisaalta teollisuuden ilmoitukset sisältävät myös viestejä polttomoottorien jatkokehittämisen jäädyttämisestä, mikä johtaa oletamaan, että polttomoottoristen autojen polttoaineen kulutus ei enää parane kovin merkittävästi. WEM-skenaariossa on kuitenkin oletettu paranemista tapahtuvan vajaat 10 % nykytilanteesta vuoteen 2030 mennessä. Tämä vastaa n. 1 % paranemista vuodessa, mikä on ollut Traficomien tilaston mukaan keskimääräinen kehitys Suomessa vuosina 2018–2020 uusissa bensiinimoottorisissa autoissa.

Dieselmoottorin osuus ensirekisteröinneissä on viime vuosina alentunut merkittävän nopeasti, noin 5 %-yksikköä vuodessa jääden jo viime vuonna pienemmäksi kuin ladattavien markkinaosuus (15 % vs. 16,7 %). Tähän on johtanut toisaalta kiristyvien pakokaasumääräysten aiheuttama kustannusten nousu, mikä on karsinut dieselin kokonaan pois pienemmistä, enemmän myydyistä autoista, ja toisaalta negatiivisävyinen uutisointi dieselin aiheuttamista ilmanlaatuongelmista. Käytettyinä maahan tuotujen autojen joukossa dieselin osuus on kuitenkin pysynyt lähes ennallaan. Raskaassa kuljetuskalustossa dieselmoottori on kuitenkin edelleen lähes yksinvaltiainen, noin 95 % markkinaosuudella, ja WEM-skenaariossa sen oletetaan pysyvän yli 90 % tasolla vuoteen 2030 asti.

Autojen uusiin käyttövoimiin kuuluu myös metaanikaasu, jonka suosio on ollut kasvava, ja biokaasusta odotetaan merkittävää lisää uusiutuvien polttoaineiden valikoimaan. Kaasua käyttävien raskaiden autojen määrä on myös kasvussa, mutta henkilöautojen kohdalla eri merkkien ilmoitukset kaasuautojen valmistuksen lopettamisesta jo varsin pian, on laimentanut uusien kaasuautojen rekisteröintejä. Siksi päivitettyyn WEM-skenaarioon sisältyy vain noin 25 000 kaasuhenkilöautoa. Sen sijaan raskaassa kuljetuskalustossa oletetaan nykyisen, noin sadan auton kannan kasvavan lähes 1500 autoon. Raskaassa liikenteessä kuitenkin käytetään pääasiassa nesteytettyä metaania (LNG tai LBG), jolloin kaasun tuotannossa joudutaan kasvattamaan laitospinta, koska nesteytysprosessia ei kannata lisätä kovin pieniin laitoksiin. Metaanikaasun käyttömääräksi ennakoitaan vähän alle 1 TWh vuonna 2030, ja WEM-skenaariossa se nousisi tasolle 2 TWh vuonna 2045 mennessä. WAM-oletuksissa biokaasua on enemmän, noin 2 TWh jo vuonna 2030.

Taulukko 3. WEM- ja WAM-skenaarioiden mukaiset automäärät käyttövoimittain.

Henkilöautoja	WEM			WAM	
	2020	2030	2045	2030	2045
Bensiini	1 898 000	1 537 000	1 015 000	1 487 000	462 000
Diesel	761 000	662 000	305 000	584 000	159 000
Kaasu	12 000	24 000	5 000	24 000	5 000
Sähkö	55 000	622 000	1 715 000	750 000	2 415 000
Yhteensä	2 736 000	2 850 000	3 041 000	2 850 000	3 041 000

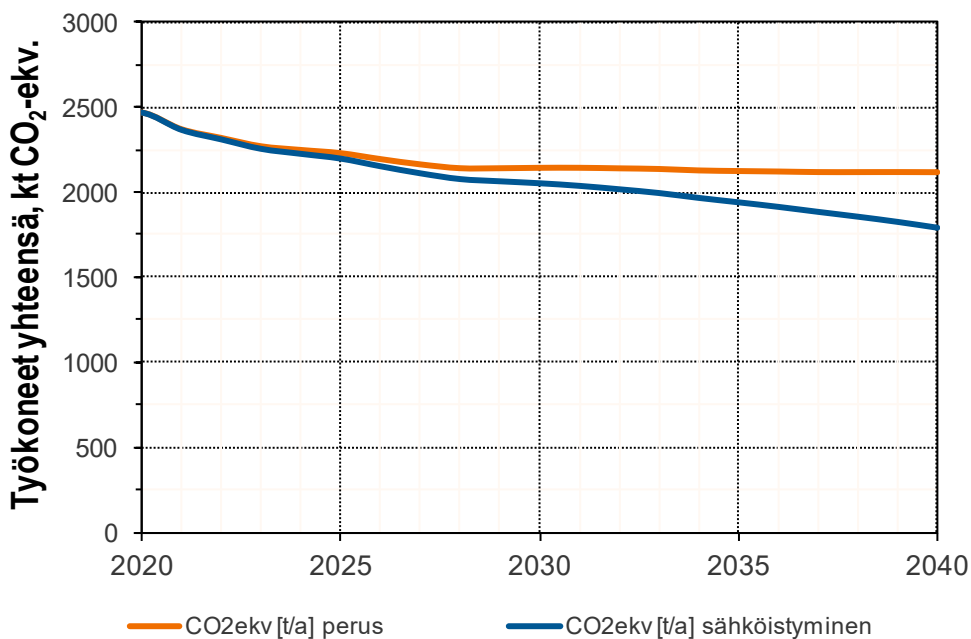
3.9 Työkonekannan kehitys

Työkonekannan kehitys WEM-skenaariossa pohjautuu aiemmin tehtyyn arvioon työkoneiden sähköistymisen etenemisestä Suomessa (Markkanen & Lauhkonen 2021). Työkonekannan kokoon vaikuttavat päätekijät ovat vuosittaiset myyntimäärät ja poistumat, joiden oletetaan pysyvän nykytasolla. Perinteisten polttomootorikäyttöisten työkoneiden myyntiosuus pienenee hybridi- ja sähkökäyttöisten myyntiosuuden lisääntyessä; sähköistymisen muutosnopeus on määritelty erikseen kullekin työkoneeryhmälle. Kehityksen oletetaan olevan nopeinta pienten ja rajatuilla alueilla operoitavien työkoneiden osalta (esimerkiksi trukkit ja monet puutarhakoneet) ja hitainta suuritehoisten, infran ulottumattomissa operoitavien työkoneiden (esimerkiksi monet maatalous- ja metsäkoneet) osalta.

Sähkökäyttöisten työkoneiden osuus kaikista myynneistä on WEM-skenaariossa noin 34 % vuonna 2040, mutta osuuden kasvu vähentää polttoainekäyttöä vain noin 15 %

(Kuva 8). Kaasukäyttöisten työkoneiden osalta mitään kehitystä ei oleteta, sillä nykytiedon valossa kaasutyökoneiden laajamittainen tekninen kehitys on alkutekijöissään. TIMES-mallinnuksen WAM-skenaariossa työkonekanta sähköistyy hieman nopeammin kuin WEM-skenaariossa siten, että sähkökäyttöisen kannan osuuden kasvu vähentää polttoainekäyttöä noin 35 % vuoteen 2040 mennessä.

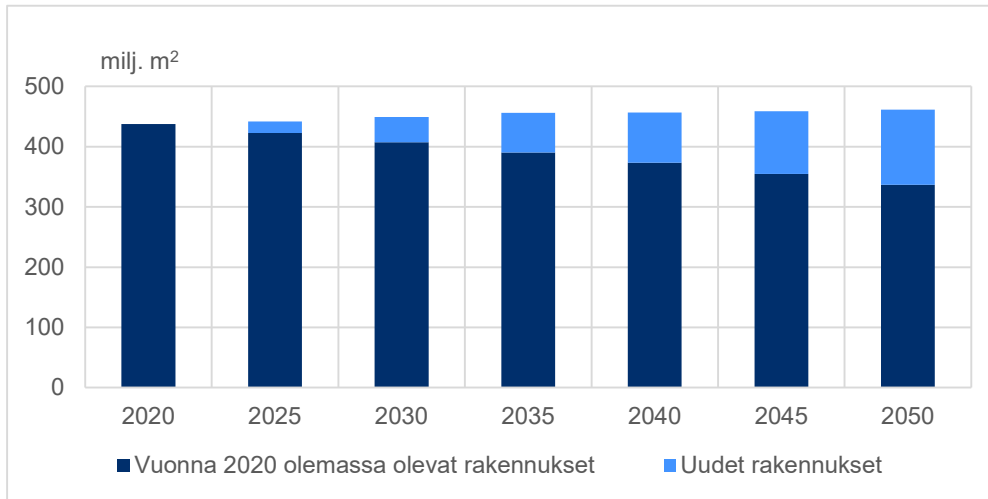
Kuva 8. Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt 2020–2040, TYKO perusennuste.



3.10 Asuin- ja palvelurakennuskannan kehitykset

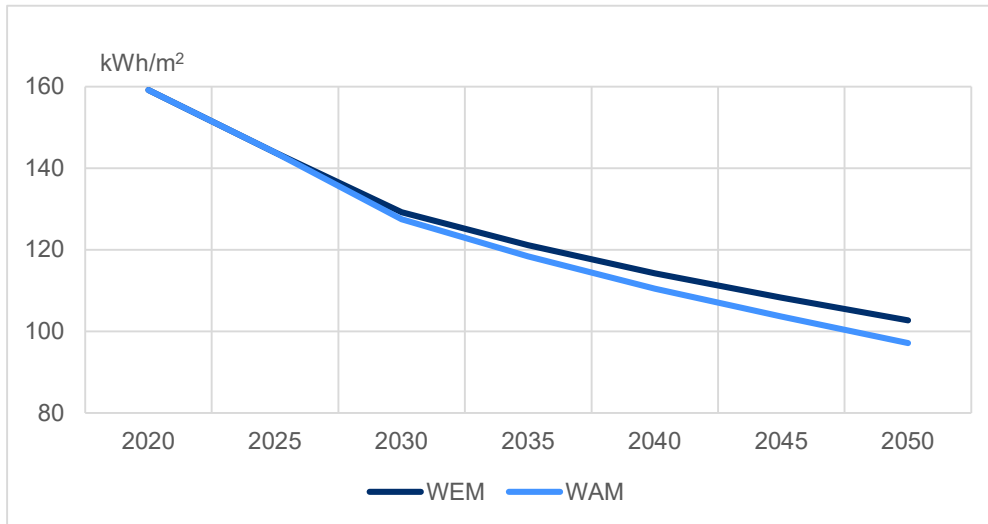
Rakennuskannan laajuus on sama WEM ja WAM skenaarioissa. Skenaariot eroavat toisistaan rakennusten energiatehokkuuden osalta. Lähtökohtana on vuonna 2020 mennessä valmistunut rakennuskanta, joka muodostuu omakotitaloista (165 milj. m²), rivi- ja kerrostaloista (140 milj. m²), palvelurakennuksia (110 milj. m²) ja kesämökeistä (25 milj. m²). Vuoteen 2050 mennessä vuoden 2020 rakennuskannasta (440 milj. m²) on jäljellä noin 75 prosenttia. Uudisrakentaminen korvaa poistumaa ja kasvattaa rakennuskantaa noin viidellä prosentilla, niin että vuonna 2050 rakennuskannan kerrosala on 460 m² (Kuva 9). Uusien rakennusten osuus tulevasta vuoden 2050 rakennuskannasta on noin 30 prosenttia ja jo nyt olemassa olevien rakennusten loput 70 prosenttia.

Kuva 9. Vuoden 2020 rakennuskannasta (440 milj. m²) on jäljellä vuonna 2050 noin 75 %. Yhteensä vuoden 2050 rakennuskanta on 460 milj. m².



WEM skenaariossa vuoteen 2020 mennessä valmistuneiden rakennusten määrä, energiatehokkuus ja energiantarve noudattavat korjausrakentamisen pitkän aikavälin strategian mukaista kehityspolkua. Energiatehokkuuden parannukset tehdään osana normaalia korjaustoimintaa ja niihin kannustetaan energia-avustuksilla ja öljylämmityksestä luopumiseen kohdennetuilla avustuksilla. Energiatehokkuuden parannuksissa noudatetaan ympäristöministeriön asetusta 4/2013. Uudisrakentamisessa noudatetaan ympäristöministeriön asetusta 1010/2017. WAM skenaariossa energiatehokkuudelle asetettuja vaatimuksia tiukennetaan niin, että vuonna 2050 ero WEM skenaarioon on noin viisi prosenttia (Kuva 10). Jo 2030 luvulla on luovuttu lähes kokonaan fossiilisilla polttoaineilla toimivista kiinteistökohtaisista lämmityskattiloista. Kiinteistökohtaisessa lämmöntuotannossa hyödynnetään uusiutuvia lämmönlähteitä (biopolttoaineita, lämpöpumpuilla tuotettua lämpöä, aurinkoenergiaa). Rakennusten lämmityksen päästöt tulevat 2030 luvulta lähtien lähes yksinomaan sähkön ja kaukolämmön tuotannosta. Ostoenegian tarve vähenee lämmöntarvetta enemmän lämpöpumppujen ja aurinkoenergian hyödyntämisen ansiosta.

Kuva 10. Lämmitysenergian tarve (kWh/m²) kattaen tilojen ja käyttöveden lämmityksen vähenee vuoden noin 160 kWh/m² tasolta noin 100 kWh/m² tasolle.



3.11 Sähkön tuotantovaihtoehdot

Sähkön tuotanto on energiajärjestelmän keskeisimpiä osia, ja energiajärjestelmän sähköistyminen entisestään on trendi, jonka merkityksen arvioidaan korostuvan kaikilla sektoreilla. Sähkön tuotantovaihtoehtoja ja -tekniikoita on kuvattu laskentamallissa laajasti, pyrkien kattamaan kaikki potentiaalisesti merkittävät teknologiat perinteisistä lämpövoimalaitoksista ja yhdistetyistä sähkön ja lämmön tuotantolaitoksista alkaen. Vaikka tulevaisuuden voimalaitosteknologia painottuu valtaosin muihin kuin polttoaineiden polttoon perustuviin vaihtoehtoihin, nykyaikaiselle bioenergiatekniikalle jäänee vielä pitkään huomattava merkitys yhdyskuntien ja teollisuuden energiantuotannossa.

Tuulivoiman tuotantotekniikka on kuvattu mallissa jaettuna maa-, rannikko- ja merituulivoimaan (Onshore, Nearshore ja Offshore) sekä arktiseen tunturituulivoimatekniikkaan. Uusien laitosten potentiaali on näiden lisäksi jaettu useisiin eri tuulisuusluokkiin, ja laitosten teknistaloudellisen suorituskyvyn on oletettu paranevan vuosikerroittain. Uusiutuvista sähköntuotantomuodoista myös aurinkovoimalla on pitkällä tähtäimellä Suomessakin erittäin suuri potentiaali, mutta ongelmana on meillä voimakas vuodenaikojen mukainen vaihtelu. Mallin tietokannassa on otettu huomioon arvioitu tuleva kustannuskehitys ja vaihtelevan tuotannon tyypilliset ajalliset profiilit ja käyttökertoimet Suomen olosuhteissa. PV-laitokset on jaettu pieniin asuinrakennusten ja palvelurakennusten katoille asennettaviin laitoksiin, keskisuuriin yhdyskuntien kiinteäkulmaisiiin

järjestelmiin sekä suuriin ns. utility-scale -laitoksiin, joissa tuotantoa voidaan optimoida *kääntyviin* telineisiin asennetuilla paneeleilla. Myös keskittävä aurinkovoimatekniikka on kuvattu mallissa.

Muun muassa vetytalouden mahdollista läpimurtoa ajatellen mallissa on mukana myös polttokennovoimalaitosteknologiavaihtoehtoja, mukaan luettuna vaihdettava-suuntaiset polttokennot (reversible fuel cell), joilla voidaan tuottaa esimerkiksi päivällä vetyä ja yöllä vedystä sähköä aurinkovoimatuotannon tasaamiseksi. Investoimalla vetyvarastoihin, paineilma- tai vesivarastoihin tai halpenevaan akkuteknologiaan malli voi tarvittaessa lisätä sähkön varastoinnin kapasiteettia Suomessa jopa kausitasolla, mikäli se osoittautuisi tulevaisuudessa kannattavaksi, jos vaikkapa vesivarastojen tarjoama jousto ei ole enää riittävä tukemaan laajaa tuotannon vaihtelua.

Ydinvoiman osalta skenaario-oletusten mukaan Olkiluoto 3 käynnistyy vuonna 2022 (1600 MW) ja Hanhikivi 1 vuonna 2032 (1200 MW). Lisäksi Suomen vanhojen ydinvoimalaitosten käytöstäpoiston aikatauluja päivitettiin työssä viimeisimpien näkemysten mukaisiksi. Mallissa on kuvattu myös uusia ydinvoimatekniikoita, kuten pienten modulaaristen reaktorilaitosten teknologia, mutta tässä työssä näiden ei oletettu saavan kaupallista sijaa Suomessa.

3.12 Vaihtoehtoisten polttoaineiden tuotanto

3.12.1 Biopoltonesteet

Biopoltonesteitä (biodiesel, biobensiini, biokerosiini, biometanoli) voidaan tuottaa eri biomassoista monilla erilaisilla prosesseilla. FT (Fisher Tropsh) -prosesseja voidaan mukauttaa varsin joustavassa suhteessa erilaisiin biomassaraaka-aineen kulutussuhteisiin, jolloin biomassan käyttöä voidaan vähentää tuomalla prosessiin energiaa sähköstä tuotetulla vedyllä. Tuotetta voidaan tällöin kutsua myös sähköpolttoaineeksi, vaikka sähköpolttoaineiden määrittely ei ole nykyisellään mitenkään selkeä. Niin kauan, kun muita hiilen lähteitä ei ole, biomassan käytön alaraja määrittyy tuotteen tarvittavan hiilen määrän mukaan, mutta jos hiiltä voidaan tuoda prosessiin talteenotettuna hiilidioksidina, raaka-ainebiomassan määrää voidaan vähentää nollaan asti, jolloin voidaan jo puhua varsinaisesta sähköpolttoaineesta. Laskentamallissa käytettyjen biopolttaineiden tuotantoprosessien lähtötiedot on kerätty monista eri lähteistä (mm. Hannula & Kurkela 2013, Hannula 2015, Hannula 2016, Hannula & Melin 2020, DEA 2020). Biopolttaineilla voidaan mallissa korvata fossiilisia polttoaineita kaikissa moottorikäyttöisissä liikennemuodoissa.

3.12.2 Biokaasu

Hahmotellussa WEM- ja WAM-skenaarioissa on oletettu sähköistymisen ohella biokaasun roolin nousevan liikennepolttoaineena erityisesti tieliikenteessä, mutta myös nesteytettynä laivaliikenteessä. Biokaasun tuotannon merkittävä lisäys edellyttäisi paitsi laajaa maatalouden lannan biokaasutusta myös runsaasti muuta biomassan kasutukseen perustuvaa tuotantoa, jonka huomattavimpina raaka-aineina olisivat nurmi ja olki. Mallissa kuvattu biokaasun tuotannon kokonaispotentiaali näistä kolmesta lähteestä on yhteensä noin 8 TWh. Maataloustuotannon nykykehitysarvioin lannasta voidaan MTK:n tiekartan mukaisesti tuottaa parhaimmillaan noin 1,6 TWh, nurmesta noin 3,5 TWh ja oljesta noin 3 TWh (Lehtonen ym. 2020, Marttinen ym. 2015, Hakala ym. 2014). Biometaanina voidaan tuottaa myös monissa muissa biojalostusprosesseissa, joista esimerkkinä on Haapaveden lähivuosina käynnistyvä puuraaka-ainetta käyttävä biojalostamo. Laskentamallissa käytettyjen biokaasun tuotantoprosessien ja kaasun jatkojalostuksen lähtötiedot on kerätty useista eri lähteistä (muun muassa Kymäläinen & Pakarinen 2015, DEA 2020).

3.12.3 Vety

Viime vuosiin asti vetyä on voitu tuottaa kustannustehokkaimmin höyryreformoinnilla tavallisesti maakaasusta. Esimerkiksi Kilpilahden vedyntuotantolaitos perustuu maakaasun höyryreformointiin. Yhdistettynä hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin, eli CCS:ään, tällä tekniikalla voitaisiin myös tulevaisuudessa tuottaa vetyä hiilineutraalisti kohtuullisin kustannuksin. Suomen haasteena kuitenkin on hiilidioksidin varastointiin soveltuvien geologisten muodostelmien puute, jonka vuoksi hiilidioksidi tulisi kuljettaa laivoilla tai putkea pitkin Suomen rajojen ulkopuolelle esimerkiksi Norjan merelle.

Tulevaisuudessa sekä elektrolyysitekniikan kehityksen että runsaan vaihtelevan uusiutuvan sähkön tuotannon aiheuttaman sähkön marginaalihintojen laskun voidaan odottaa kuitenkin laskevan sähköstä tuotetun vedyn kustannuksia tuntuvasti. WEM-skenaariossa oletetaan, että vetyteknologiat eivät kehity yhtä nopeasti, kuin WAM-skenaariossa, jossa kehitystä ajaa kunnianhimoisempi ilmasto- ja energiapolitiikka myös Suomen rajojen ulkopuolella. WAM-laskelmissa elektrolyysin investointikustannusten oletetaan alenevan huomattavasti, noin 20 €/GJ(H₂) tasolle ja hyötysuhteen nousevan jopa 80 %:iin (LHV) vuoteen 2050 mennessä. Teoriassa SOEC-elektrolyysin hyötysuhde voi nousta 100 %:iin (HHV), mutta energiahäviöiden on käytännössä arvioitu jäävän noin 10 %:iin, josta puolet on hyödynnettävissä esim. kaukolämmöksi. Laskentamallissa käytettyjen vedynvalmistustekniikoiden lähtötiedot on kerätty monista eri lähteistä (mm. DEA 2020, IEA 2015).

3.12.4 Sähköpolttoaineet

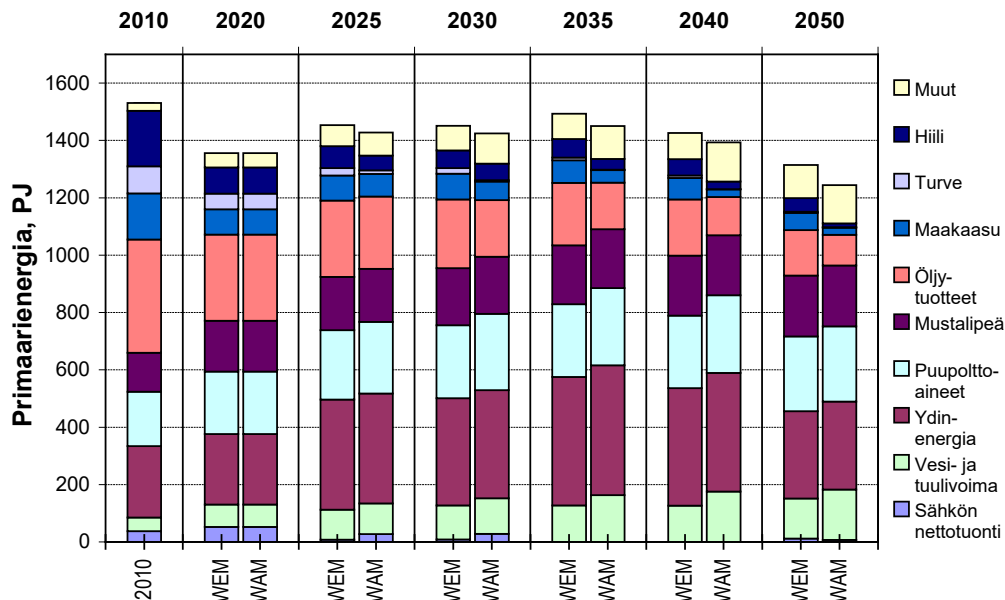
Biopolttoaineiden ohella niin Suomessa kuin muualla on viime vuosina kehitetty myös ns. synteettisten polttoaineiden tuotantoprosesseja, joilla on monia nimiä ja lyhenteitä (l. Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-x -polttoaineet, P2X, sähköpolttoaineet, jne.). Niiden tuotannon raaka-aineina voidaan käyttää esimerkiksi ilman tai savu- ja prosessikaasujen talteenotettua hiilidioksidia ja vetyä. Vety voidaan erottaa vedestä elektrolyysillä, joka kuluttaa sähköä, ja synteessin lopputuotteena voidaan jalostusta jatkamalla saada halutunlaisia hiilivetyketjuja, joilla voidaan korvata nestemäisiä tai kaasumaisia fossiilisia polttoaineita. Jos voidaan käyttää hiilidioksidia korkean pitoisuuden lähteestä tämän CCU (Carbon Capture and Utilisation) -prosessin kokonaisyötysuhde sähköstä vaikkapa bensiiniksi voi olla energiatehokkaan elektrolyysin ansiosta jopa yli 60 %, mutta jos hiilidioksidi otetaan talteen ilmasta, hyötysuhde jää helposti 50 %:n tasolle tai sen alle ja myös talteenoton investointikustannukset lisäävät kustannuksia merkittävästi. Laskentamallissa käytettyjen konversioprosessien lähtötiedot on kerätty monista eri lähteistä (mm. DEA 2020, Keith ym. 2018, Hannula 2016, Bokinge ym. 2020).

4 Energiajärjestelmän kehitys

4.1 Energian hankinta

Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä (LULUCF-sektori poislukien) energiaperäisten päästöjen osuus on Suomessa lähes 80 %, joten energian kokonaiskulutus on päästöjen kehityksen kannalta keskeinen. Suomen primaarienergian kokonaiskulutuksesta (Kuva 11) fossiilisten polttoaineiden ja turpeen osuus oli vuonna 2019 noin 42 %, kun niiden osuus oli vielä vuonna 2010 noin 54 % (TK 2021). Niiden osuus laskee WEM-tulosten mukaan vuonna 2030 edelleen noin 30 %:iin, vuonna 2040 noin 25 %:iin ja 2050 noin 20 %:iin. Ydinenergian ja uusiutuvan energian osuudet vastaavasti kasvavat. Kun uusiutuvan energian osuus oli vuonna 2019 noin 34 % primaarienergiasta, se kasvaa WEM-skenaariossa vuoteen 2030 mennessä 43 %:iin ja 2050 mennessä 53 %:iin, WAM-skenaariossa 2030 mennessä 46 %:iin ja 2050 mennessä 61 %:iin.

Kuva 11. Primaarienergian kokonaiskulutuksen kehitys energialähteittäin WEM- ja WAM-skenaarioissa.



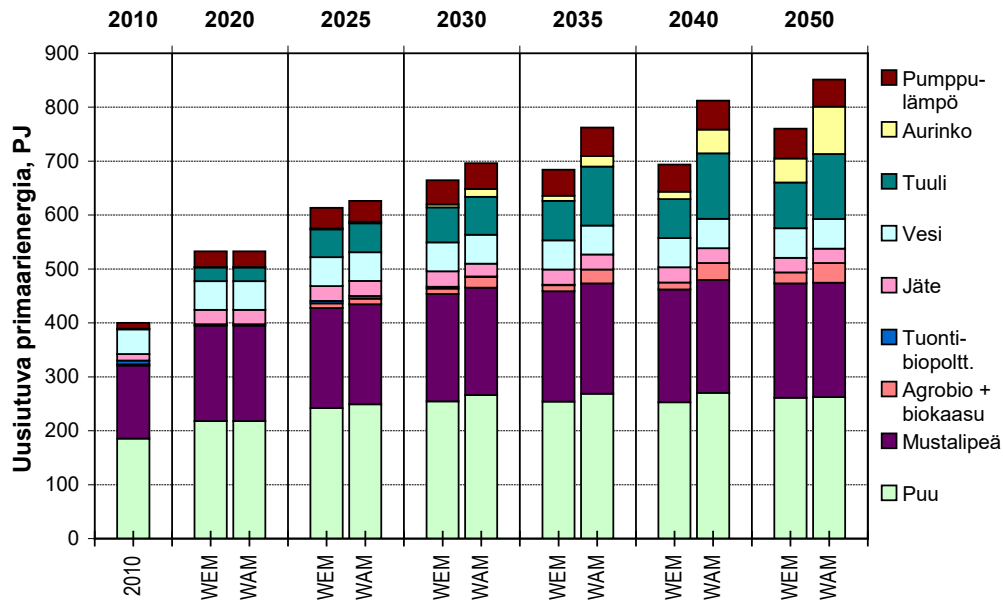
Energian kokonaiskulutus on mallinnettu ja raportoitu yhdenmukaisesti IEA:n energiataseiden kanssa, joten luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia kansallisen energiatilas-

toinnin kanssa. Primaarienergian kokonaiskulutus on WEM-skenaariossa korkeimmillaan vajaat 1500 PJ (410 TWh) vuonna 2035, jonka jälkeen kulutus alkaa pienentyä. Oletetut uudet ydinvoimalaitokset, jotka tulevat käyttöön vuosina 2022 ja 2032, ovat suurin yksittäinen primaarienergian kulutusta lisäävä tekijä. WAM-skenaariossa primaarienergian kulutus jää 2–5 % WEM-skenaariota pienemmälle tasolle.

Vuoteen 2030 mennessä eniten vähenevät turpeen ja kivihiilen energiakäyttö, mutta maakaasun kokonaiskäyttö sen sijaan voisi tulosten mukaan WEM-skenaariossa jopa hieman kasvaa vuoden 2020 tasosta. WAM-skenaariossa fossiilisten polttoaineiden käytön supistuminen voimistuu, ja tällöin myös maakaasun käyttö vähenee huomattavasti jo 2030 mennessä. Turpeen ja kivihiilen käytön väheneminen heijastuu toisaalta kummassakin skenaariossa bioenergian, etenkin puupolttoaineiden käytön kasvuna.

Uusiutuvan energian hyödyntämisen laajeneminen näkyy selvemmin kuvasta 12, jossa on esitetty uusiutuvan primaarienergian kehitys vuoteen 2050. Vaikka puuenergian kysyntä kasvaa tulosten mukaan sekä WEM- että WAM-skenaariossa tuntuvasti vuoteen 2030 mennessä, kasvusta suuri osa syntyy suoraan metsäteollisuuden tuotannon ja raaka-ainepuun kasvun myötä sivutuotevirtoina (Kuva 13). Koska runkopuuta ei ainespuuksi huonosti soveltuvaa harvennusten pienpuuta lukuun ottamatta oletettu voitavan käyttää primaarisesti energiaksi, WAM-skenaariossa puun energiakäyttö on korkeintaan runsaat 10 PJ WEM-skenaariota suurempi. Energiapuun tuonnilla puun energiakäyttöä voitaisiin kasvattaa, mutta kestävyysnäkökohtien perusteella tuonti oli mallinnuksessa rajoitettu korkeintaan noin 5 TWh:n määrään, kun se oli vuonna 2020 vajaat 4 TWh.

Kuva 12. Uusiutuvan primaarienergian hyödyntämisen kehitys WEM- ja WAM-skenaarioissa 2010–2050.



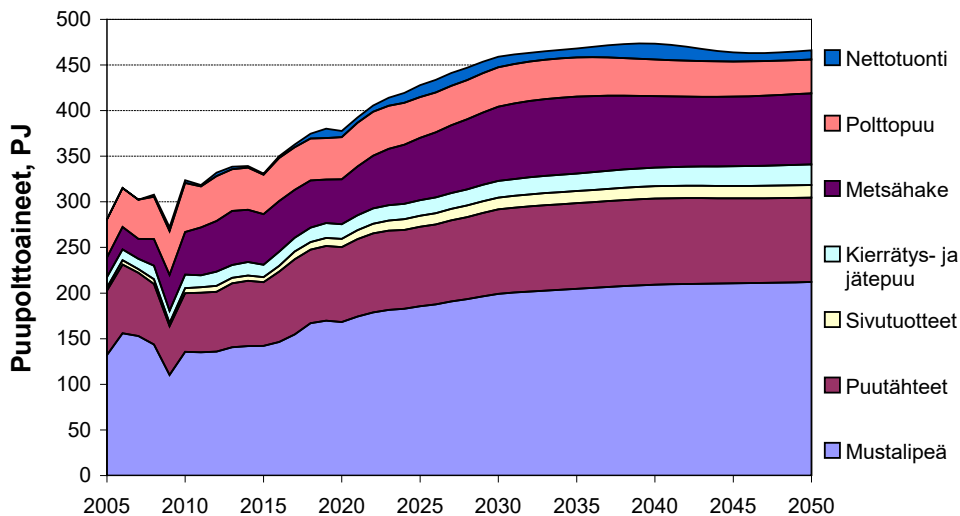
Vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian (TEM 2017) WEM-skenaarioon kuuluneita metsähakkeen käytön lisäämiseen tähtääviä toimia ei sisällytetty enää HIISI-hankkeen WEM-skenaarioon. Näin ollen aiemmin laskennallisesti arvioituja metsähakkeen käytön arvioita (noin 25 TWh vuonna 2030 ja 29 TWh vuonna 2030) ei saavuteta kummassakaan skenaariossa, vaan metsähakkeen käyttö pysyy skenaariotulosten mukaan jonkin verran alhaisemmalla tasolla. Kotimaisen metsähakkeen käyttö lämpö- ja sähkölaitoksissa oli vuonna 2020 noin 7,5 miljoonaa kuutiometriä (15 TWh). Lisäksi metsähaketta käytettiin pientalojen erillislämmityksessä 0,6 miljoonaa kuutiometriä, jolloin kokonaiskäyttö oli noin 8,1 miljoonaa kuutiometriä. Vuonna 2030 käyttö kasvaa lämpö- ja sähkölaitoksissa WEM-tulosten mukaan noin 11 milj. kuutiometriin (21 TWh) ja WAM-skenaariossa noin 12 Mm³:iin (23 TWh) Erityisesti lähivuosien kehitystä tarkasteltaessa on huomattava, että viime vuosina lisääntynyt tuontihakkeen käyttö korvaa osittain kotimaista metsähaketta sähkö- ja lämpölaitoksissa.

Tuuli- ja aurinkoenergia nousevat Suomen vähäpäästöskenaarioissa merkittävään asemaan uusiutuvan energian hankinnassa. Vielä vuonna 2019 niiden osuus oli vain 4,6 % uusiutuvasta energiasta, mutta WEM-skenaariotulosten mukaan osuus nousee vuoteen 2030 mennessä 11 %:iin ja vuonna 2050 noin nelinkertaiseksi, 17 %:iin, ja WAM-skenaariossa vastaavasti 23 %:iin vuonna 2030 ja vuonna 2050 yli 45 %:n. Tuulivoiman osalta on hyvä pitää mielessä, että viime vuosina sen kilpailukyvyyn kehitys on ollut nopeaa, ja uusien voimalainvestointien kohdentumista Pohjoismaisilla



markkinoilla on vaikea arvioida, minkä vuoksi myös tuloksiin sisältyy tältä osin epävarmuutta. Tuulivoimaan liittyvissä laskentaoletuksissa on huomioitu julkisiin lähteisiin perustuvat tiedot investointipäätöksistä vuoteen 2023 asti.

Kuva 13. Puupolttoaineiden ja metsäteollisuuden sivuvirtojen energiakäytön kehitys WAM-skenaariossa päälajeittain.



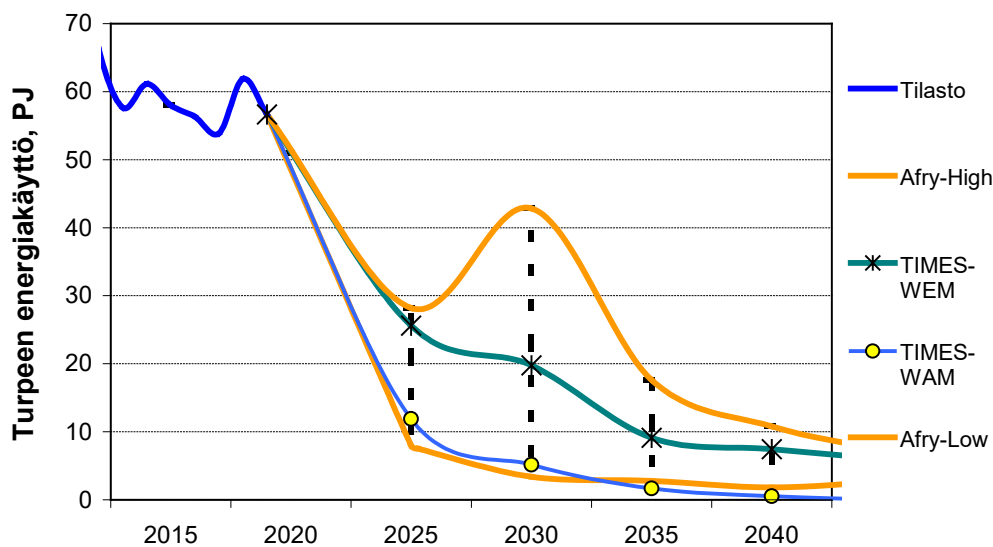
Myös aurinkovoiman osalta teknis-taloudellinen kehitys on nopeaa, ja WEM-skenaariion tulos noin 1,6 TWh:n tuotannosta vuonna 2030 saattaa hyvin ylittyä, mikäli kiinteistöt saavat omasta tuotannosta realisoiduksi tuntuvaa etua myös siirtokustannusten ja sähköverojen alenemisena. WAM-skenaariion mukaisen 3,8 TWh:n tason toteutumisista voidaan siten myös jo hyvin pitää mahdollisena.

Turpeen energiakäytön väheneminen asettuu tarkastelluissa skenaariossa varsin hyvin vuonna 2020 valmistuneen turpeen energiakäytön kehitystä arvioineen selvityksen (Afray 2020) energiaverotuksen ja päästöoikeuksien hinnan kannalta vertailukelpoisten skenaarioiden kehitysarvioiden väliin (Kuva 14). Turpeen käytön supistuminen on etenkin vuoteen 2025 mennessä hyvin nopeaa, jolloin se putoaa WEM-skenaariossa alle puoleen 2010-luvun keskimääräisestä tasosta. WAM-skenaariossa muun muassa oletetut päästöoikeuden hinnat ja verojen korotukset johtavat vielä nopeampaan turpeen käytöstä luopumiseen. Ongelmaksi voi tällöin muodostua korvaavien energialähteiden saatavuus erityisesti yhdyskuntien lämmön tuotantoon, sillä vaikka puupolttoaineet ovat lämmöntuotannossa luontevin korvaava polttoaine, niiden tuotannon lisäys on rajoitettua ja tuotannon ja kulutuksen väliset kuljetusetäisyydet suurenevät.



Vuoden 2030 jälkeen turpeen energiakäyttö laskee WAM-skenaariossa jo alle 1 TWh:n, eli tasolle, jolla käyttö on viimeksi ollut 1970-luvulla. Tällöin turpeen energiakäyttö on laskentamallin mukaan rajoittunut enää vähäisiin määriin biopolttoaineiden tukipolttoaineena.

Kuva 14. Turpeen energiakäytön kehitys WEM- ja WAM-skenaarioissa suhteutettuna "Selvitys turpeen energiakäytön kehityksestä Suomessa" -raportin vertailukelpoisiin skenaarioihin, joiden vaihteluvälinä on esitetty "Afyri-High" ja "Afyri-Low".



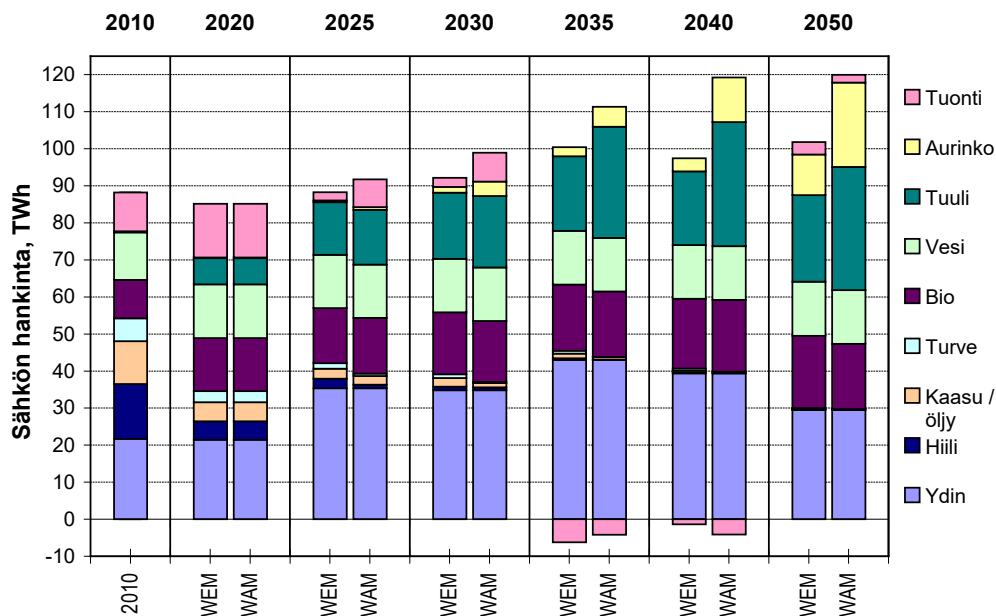
Sähkön ja lämmön tuotanto on maailmanlaajuisesti tärkein hiilidioksidia polttoaineiden poltosta tuottava sektori, ja Suomessa sen osuus polttoaineiden polton hiilidioksidipäästöistä on ollut lisäksi kansainvälistä keskiarvoa suurempi, joten sähkön ja lämmön tuotannon kehityksellä on keskeinen merkitys etenkin tulevissa hiilineutraalisuuteen tähtäävissä WAM-ilmastotoimissa. Mallilaskelmien mukainen sähkön kokonaishankinnan kehitys on esitetty energialähteittäin kuvassa 15.

Vuonna 2010 sähkön kokonaiskulutus oli noin 88 TWh, jonka jälkeen 2011–2019 kulutus on vaihdellut 83 ja 87 TWh:n välillä. Vuosi 2020 puolestaan oli Suomessa toisaalta mittaushistorian kaikkien aikojen lämpimin ja toisaalta myös koronavirusepidemian vuoksi taloudellisen toimeliaisuuden osalta melko syvän taantumakuopan vuosi, joista syistä myös sähkön kokonaiskulutus laski poikkeuksellisen alas. On siten hyvä muistaa, että mallinnetut skenaariot perustuvat tulevaisuuden osalta normaalivuosiin, eikä vuoden 2020 erityisluonnetta ole voitu ottaa huomioon kuin pieneltä osin. Oletus-



ten mukaan Suomen talous palautuu koronalamasta varsin nopeasti, ja tulosten mukaan sähkön kokonaiskulutus nousee vuonna 2030 jo yli 92 TWh:n tason. Sähkön kulutus ja tuotanto ovat tällöin lähes tasapainossa uuden ydinvoimalaitoksen ja nopeasti kasvaneen tuulivoimakapasiteetin ansiosta. Sähköistyminen on näkyvää jo 2020-luvulla muun muassa liikenteen sähköajoneuvojen markkinaosuuden voimakkaana kasvuna. Energiatalouden sähköistyminen jatkuu tämän jälkeenkin voimakkaana, ja sähkön kulutus kasvaa vuoteen 2050 mennessä WEM-skenaariossakin noin 100 TWh:n tasolle ja WAM-skenaariossa noin 120 TWh:n tasolle.

Kuva 15. Sähköenergian kokonaishankinnan kehitys WEM- ja WAM-skenaarioissa.



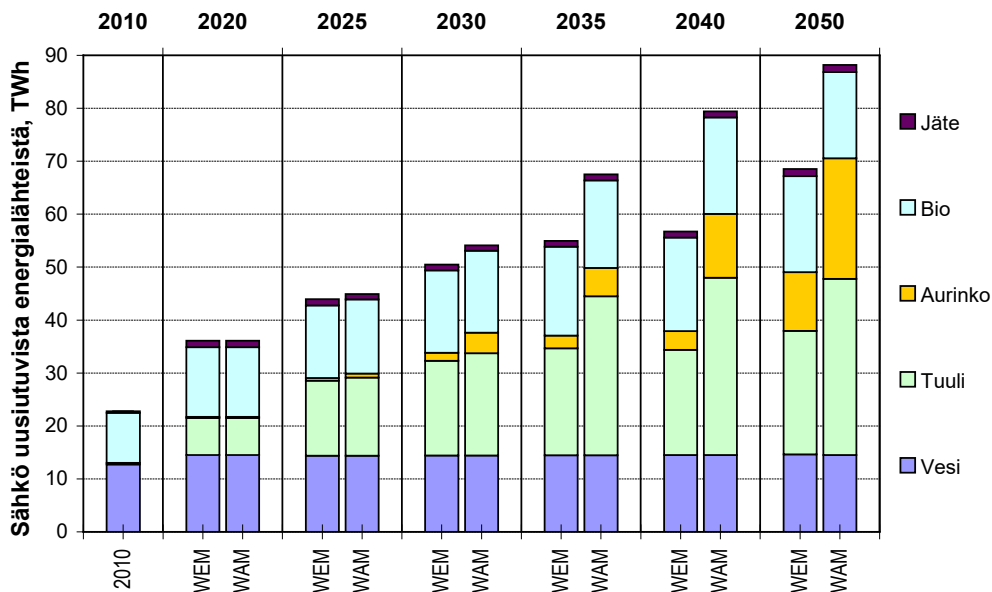
Sähkön tuotantorakenteessa tapahtuu vuoteen 2030 mennessä erittäin suuria muutoksia verrattuna vuoteen 2010. Sekä hiilivoiman että turvevoiman tuotanto putoavat kumpikin murto-osaan vuoden 2010 tasosta, ja melkein yhtä voimakkaasti vähenee myös maakaasuvoiman tuotanto. Fossiilisiin polttoaineisiin ja turpeeseen perustuvasta sähköntuotannosta voidaan siten lähes luopua jo vuoteen 2030 mennessä. WEM- ja WAM-skenaarioissa ei ole tässä suhteessa kovin suurta eroa.

Sähköntuotannon omavaraisuus paranee tulosten mukaan 2020-luvulla voimakkaasti WEM-skenaariossa, erityisesti ydinvoiman ja tuulivoiman tuntuvan lisäyksen myötä. Vuoden 2030 tilanteessa sähköntase on WEM-skenaariossa suunnilleen tasapainossa,

ja sen jälkeen Suomi muuttuu sähkön nettoviejäksi noin vuoteen 2045 asti. WAM-skenaariossa nopeampi energiatalouden sähköistyminen ja fossiilisista polttoaineista luopuminen aiheuttavat kuitenkin sähkön tuontitarpeen palautumisen noin 8 TWh:n tasolle vuonna 2030. Sähköistyminen jatkuu edelleen voimakkaana vuoden 2030 jälkeenkin, mikä johtaa tulosten mukaan kummassakin skenaariossa nettotuonnin tarpeeseen vuotta 2050 lähestyttäessä. Sähkötaseen tasapaino voi toki melko herkästi muuttua sen mukaan kuin tuuli- ja aurinkovoiman lisäinvestointeja suuntautuu joko Suomen rajojen sisäpuolelle tai lähialueille. Runsaat investoinnit kulutuksen ylittävään kapasiteettiin tuskin kuitenkaan muodostuvat kannattaviksi.

Kaikkiaan sähkön tuotanto uusiutuvilla energialähteillä ja jätepolttoaineilla on vähintäänkin kaksinkertaistunut vuoteen 2030 mennessä vuoden 2010 tasosta (Kuva 16). Suurinta kasvu on 2020-luvulla tuulivoiman tuotannon laajenemisen ansiosta ja 2040-luvulla aurinkosähkön lopullisen läpimurron myötä. Vesivoiman tuotannossa ei ole otettu huomioon ilmastonmuutoksen mahdollista vaikutusta tuotannoissa olevien vesistöjen valumiin, joten tuotantotaso kasvaa mallinnustuloksissa hyvin maltillisesti lähinnä vanhojen laitosten kunnostuksen kautta.

Kuva 16. Sähkön tuotanto uusiutuvista energialähteistä ja jätepolttoaineista WEM- ja WAM-skenaarioissa.



Yhdyskuntien yhdistetty sähkön tuotanto lämmöntuotannon yhteydessä (CHP) supistuu WEM-skenaarioiden tulosten mukaan hitaasti 6–7 TWh:iin vuonna 2050. WAM-skenaariossa supistuminen on aluksi nopeampaa vuosina 2020–2040, mutta vuonna

2050 CHP-tuotannon taso on vain hieman WEM-skenaariota pienempi. Laajaan käyttöön jää jäljelle pääasiassa vain bioenergiapohjainen yhteistuotanto, joka sijoittuu tulevaisuudessa usein myös integroituihin biojalostamoihin. Biosähkön kokonaistuotanto nousee sekä turpeen ja kivihiilen käytöstä luopumisen vastapainona että jonkin verran myös metsäteollisuuden sellutuotannon kasvavia lämpöylijämiä hyödyntämällä, koska paperin tuotannon aleneminen pienentää myös merkittävästi paperiteollisuuden lämmönkulutusta.

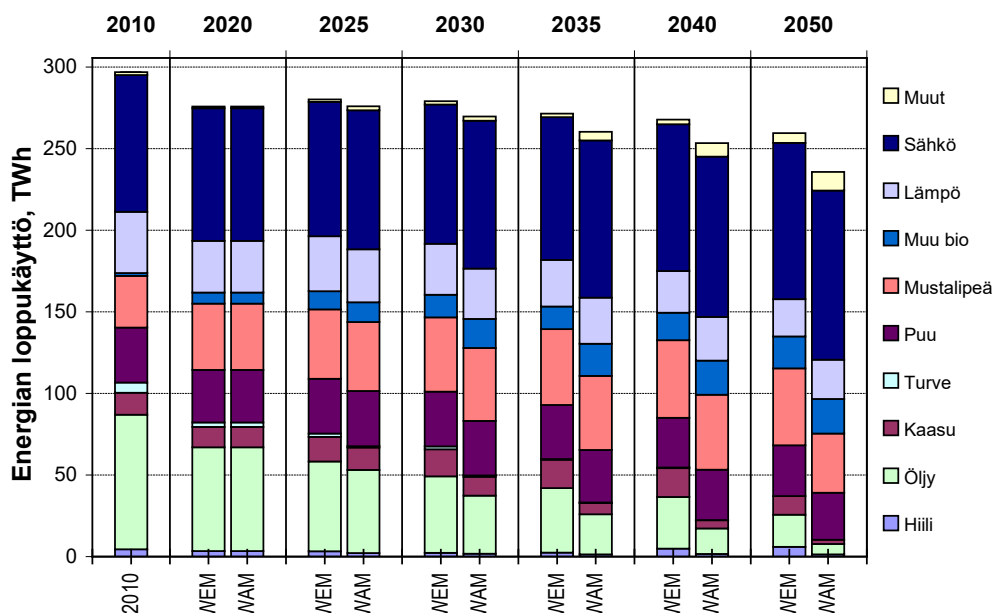
Vaikka bioenergian hinnat nousevat tuntuvasti vähäpäästöskenaarioissa kysynnän kasvaessa, kaukolämpöverkkojen olemassa olevan infrastruktuurin vuoksi yhdyskuntien kaukolämpöön perustuva lämmöntuotantojärjestelmä ei kuitenkaan dramaattisesti supistu. Kaukolämmön erillistuotannossa lämpöpumppujen käyttö toisaalta laajenee huomattavasti, mikä lisää osaltaan energiasektorin omaa sähkön kulutusta. WAM-skenaariossa kaukolämpöpumppujen alennettu sähköveroluokka tukee lisäksi siirtymää tulevaisuuden joustaviin kaukolämpöjärjestelmiin. Sähköntuotanto jätepolttoaineita hyödyntävissä laitoksissa pysyy sekä WEM- että WAM-skenaariossa lähes nykyisellä tasolla vuoteen 2050 saakka.

4.2 Energian kulutus

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, 2020; TK, 2021). Tässä kannattaa huomata, että IEA:n noudattamien käytäntöjen mukaiset loppukulutusluvut eivät määritelmiltään täysin vastaa EU:n energiatehokkuustavoitteen mukaista loppukulutusta, jossa muun muassa lämpöpumppuenergiaa ei lasketa mukaan. IEA:n määritelmä poikkeaa myös EU:n uusiutuvan energian direktiivin mukaisesta loppukulutuksesta, jossa on mukana myös voimaloiden omakäytösähkö ja sähkön siirtohäviöt. Mallilaskelmien tulosten mukaan loppukäytön kokonaismäärä pysyy WEM-skenaariossa vuoteen 2030 saakka lähellä vuoden 2015 tasoa, mutta kääntyy sen jälkeen selvemmin laskusuuntaan (Kuva 17). Kokonaiskulutuksen vähentyessä sähkön kulutus kuitenkin kasvaa, eli loppukulutuksen tehostuminen kohdistuu erityisesti polttoaineisiin ja lämpöön, joita samalla korvataan ainakin osittain sähköllä.



Kuva 17. Energian loppukulutus energialähteittäin WEM- ja WAM-skenaarioissa.



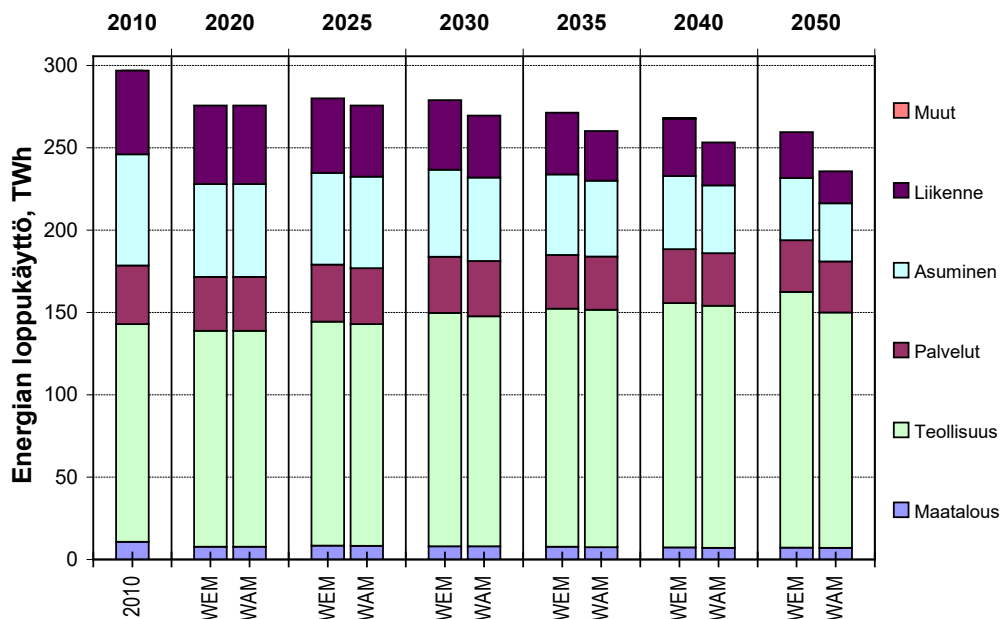
Sähköistyminen on kummassakin skenaariossa keskeinen muutostrendi kaikilla sektoreilla, mutta sen kulutusta kasvattava vaikutus kompensoituu energian käytön tehostumisella. Myös uutta sähköenergian kulutusta kuitenkin syntyy muun muassa digitalisaation, energian varastoinnin ja hiilineutraalien sähköpolttoaineiden jalostuksen laajenemisen myötä. Syvien päästönvähennysten, joita hiilineutraalisuustavoitteen toteuttaminen edellyttää, vaatii skenaariotarkastelujen tulosten mukaan silti WEM-skenaariota vielä paljon huomattavampaa sähköistymistä kaikilla energian käyttösektoreilla, sillä fossiilisia polttoaineita ei voida kokonaan korvata kestävästi esimerkiksi bioenergialla tai sähköpolttoaineilla riittävän laajassa mitassa ja riittävän nopeasti.

Sekä energiatehokkuuden paranemisen että kilpailukykyisen hiilineutraalin kaukolämmön tuotannon rajallisuuden vuoksi kaukolämmön kulutus vähenee, tosin melko hitaasti vuoteen 2040 saakka. Vuoteen 2050 mennessä kulutus putoaa kummassakin skenaariossa noin puoleen nykytasosta, mikä samalla vähentää yhdyskuntien yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon potentiaalia. Oletettu uudisrakentamisen painottuminen kerrostaloihin ja kaukolämpöpumppujen alennettu sähköveroluokka tukevat kaukolämmön asemaa taajamien kiinteistöjen lämmityksessä.

Sektorikohtaista energian loppukulutusta tarkasteltaessa merkille pantavaa on erityisesti liikenteen ja asumisen kulutuksen tehostuminen voimakkaasti, kun taas palve-

luissa ja teollisuudessa hyötyenergian kysynnän kasvu kompensoi tehostumisen aikaan saamaa kulutuksen vähentymistä (Kuva 18). Teollisuuden ja palvelujen loppuenergian kulutuksessa ei siten esimerkiksi WEM-skenaariossa tapahdu merkittävää määrällistä muutosta. Sähkön loppukulutus kasvaa erityisen merkittävästi liikenteessä ja teollisuudessa. Liikenteen sähkönkulutus nousee vuonna 2030 3–4 TWh:iin ja vuoteen 2050 mennessä WEM-skenaariossa 8,5 TWh:in ja WAM:ssa 10 TWh:iin.

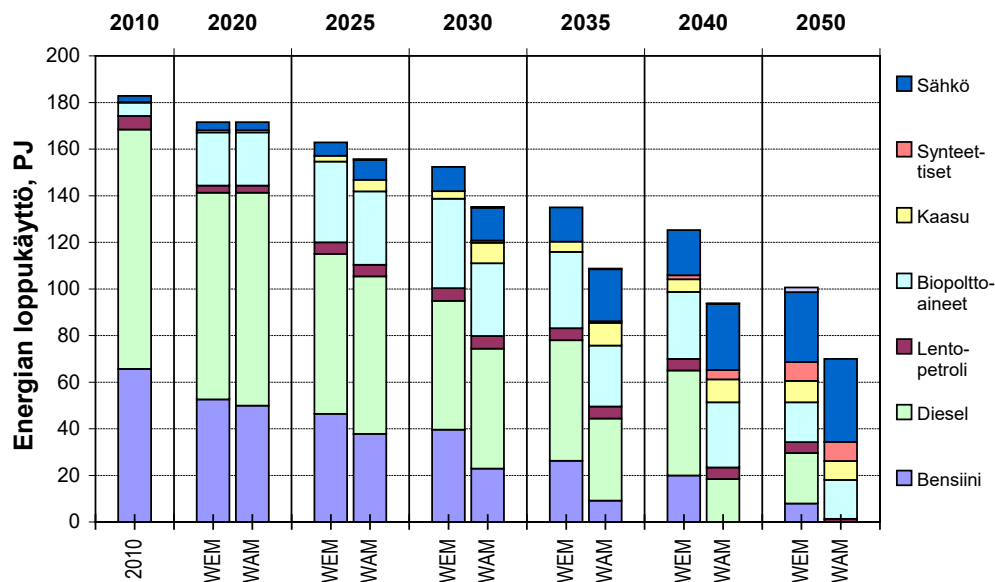
Kuva 18. Energian loppukulutus sektoreittain WEM- ja WAM-skenaarioissa.



Asumisen ja palvelujen loppukulutuksessa sähköä lukuun ottamatta kaikki muu energian käyttö vähenee lämmityksen ominaiskulutusten putoamisen myötä, joka on huomattavaa sekä uudisrakennuksissa että verrattain laajan energiakorjaustoiminnan ansiosta myös vanhassa kannassa, oletusten mukaan parhaimmillaan lähes 60 % vuoden 2015 tasosta. Teollisuudessa keskeisiä vaikutuksia ovat kaikissa skenaarioissa sähköistyminen prosessilämmön tuotannossa ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biopolttoaineilla. Kuvassa 17 teollisuus sisältää myös energiateollisuuden, jonka kulutuksen kasvu on yksi suurimmista sähkön kulutusmuutoksiin vaikuttavista tekijöistä, erityisesti WAM-vähähiiliskenaarioissa mutta huomattavana myös WEM-skenaariossa. Energiateollisuuden kulutuksen kasvu syntyy lähinnä energian varastoinnin ja konversion häviöistä, hiilineutraalien polttoaineiden tuotannosta sekä lämpöpumpujen laajenevasta käytöstä yhdyskuntien kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuotantoon. Prosessiteollisuudessa sähkön kulutusta merkittävästi lisääviä muutoksia ovat hybridisähköuunien käyttö mineraaliteollisuudessa, raudan suorapelkistys vedyllä sekä elektrolyyttinen vedyn valmistus petrokemian teollisuudessa.

Hallitusohjelman mukaan Suomi on hiilineutraali vuonna 2035, joten myös tieliikenteen suoritteiden, ajoneuvotekniikan ja sen käyttövoimien muutosten tulisi vastata tähän haasteeseen. Liikenteen WEM-skenaario perustuu LVM:n vuonna 2021 päivitettyyn perusennusteeseen, joka on lähtökohtana tarkasteltaessa lisätoimia kunnianhimoisempien hiilettömän liikenteen tavoitteiden saavuttamiseksi WAM-skenaariossa. Vuonna 2050 yli puolet henkilöautoista on oletusten mukaan kummassakin skenaariossa täyssähköautoja, WAM-skenaariossa jopa yli 80 %. Voimakas sähköistyminen heijastuu suoraan liikenteessä kulutetun kokonaisenergian vähenemisenä (Kuva 19).

Kuva 19. Kotimaanliikenteen loppuenergian kulutus WEM- ja WAM-skenaarioissa.



Liikenteen perusennusteen oletusten mukaan vuoteen bensiinin ja dieselin sekoitevoitetta nostetaan 2030 mennessä nykyisen lain mukaisesti 30 prosenttiin, eikä osuutta nosteta tämän jälkeenkään korkeammalle. WEM-skenaarion mallinnuksessa vuoden 2030 jälkeisestä rajoituksesta ensin luovuttiin, sillä teknisesti esimerkiksi dieselin bio-osuutta voitaisiin nostaa varsin helposti. Mutta koska biopolttoaineiden tuotannon kestävä raaka-ainepohja on rajallinen ja toisaalta kestävien biojalosteiden tuontihintaletuksiin liittyy merkittävää epävarmuutta, päädyttiin WEM-skenaarion mallinnuksessa lopulta samanlaiseen oletukseen, jonka mukaan osuudenkasvu rajattiin noin 30 %:in koko tarkasteluajavälillä eli vuoteen 2050 saakka. WAM-skenaariossa sen sijaan liikenteen sähköistymisen voimistumisen oletettiin vähentävän polttomootoriajouvojen energiantarvetta siinä määrin, että sekoiteosuuden voitiin olettaa kasvavan merkittävästi vuoteen 2050 mennessä, absoluuttisen määrän kasvamatta.

Keskeiset nykyisten ja uusien politiikkatoimien avulla saavutettaviksi oletetut muutokset ajoneuvokannassa perustuvat fossiilittoman liikenteen tiekartan (LVM 2020) tavoitteisiin sekä niiden pohjalta laadittuihin ALIISA-skenaarioihin. Oletukset olivat WAM-skenaariossa (ja WEM-skenaariossa) seuraavat:

- Sähköhenkilöautoja vähintään 700 000 (600 000) vuonna 2030 ja 2,9 miljoonaa (2 milj.) vuonna 2050
- Sähköpakettiautoja vähintään 30 000 (15 000) vuonna 2030 ja 250 000 (80 000) vuonna 2050
- Kaasuhenkilöautoja vähintään 25 000 (25 000) vuonna 2030, kaasurekkoja vähintään 36 000 (10 000) vuonna 2050
- Biokaasua tieliikenteeseen vähintään 1,8 TWh (1 TWh) vuonna 2030, noin 2,5 TWh (2 TWh) vuonna 2050

Suomen kotimaanliikenteen energian loppukulutus oli vuonna 2019 yhteensä 179 PJ, mikä on pienempi kuin vuonna 2010, mutta jonkin verran suurempi kuin vuonna 2015. Vuonna 2020 liikenteen loppukulutus laski koronaepidemian aiheuttaman lamaannuksen vuoksi huomattavasti, ja lienee ollut korkeintaan vuoden 2015 tasolla. WEM-skenaarion tulosten mukaan liikenteen loppuenergian kulutus kääntyy vuodesta 2020 alkaen selvään laskuun, siten että se on vuonna 2030 noin 11 % pienempi kuin vuonna 2018 ja vuonna 2045 peräti 35 % sitä pienempi (Kuva 19). Energiankulutuksen väheneminen on suurelta osin sähköistymisen ansiota, mutta myös hybridiajoneuvot ja raskaassa liikenteessä vuoden 2035 jälkeen vetyajoneuvot parantavat liikenteen energiatehokkuutta. Kotimaan lentoliikenteessä sähkölentokoneet tulevat kaupalliseen käyttöön lyhyillä reiteillä tulosten mukaan vuodesta 2040 alkaen, minkä voi arvioida olevan akkuteknologian kehittymisen ansiosta realististakin.

Jäljempänä kuvasta 28 nähdään myös skenaarioiden mukainen kotimaanliikenteen kokonaispäästöjen kehitys. Tuokset ovat vertailukelpoisia ALIISA-mallilla laskettuihin LVM:n perusennusteen mukaiseen päästökehitykseen, kun jälkimmäisiä korjataan vähentämällä meriliikenteen päästöistä kalataloussektorille kuuluvat kalastusalusten päästöt. WEM-skenaarion päästöt ovat vuonna 2030 noin 7,2 Mt ja vuonna 2035 noin 6 Mt, ja WAM-skenaarion päästöt vastaavasti 5,6 Mt vuonna 2030 ja 3,5 Mt vuonna 2035. TIMES-mallin ja ALIISA-mallin tuottamat päästöurat eroavat toisistaan jossain määrin etenkin vuoden 2035 jälkeen. Perusennustetta nopeammalle päästöjen alenemiselle ovat selityksenä toisaalta mallin tulosten mukainen sähkö- ja vetyajoneuvojen kustannustehokkuuden paraneminen vuoteen 2040 mennessä siinä määrin, että niiden markkinaosuus alkaa nousta perusennustetta korkeammaksi ilman uusia taloudellisia ohjaustoimia, ja toisaalta se, että ALIISA-mallissa polttoaineiden keskimääräiseksi bio-osuudeksi oli asetettu 30 % biokaasu mukaan luettuna. WEM-skenaarion mukainen päästötaso vuonna 2045, 4,3 Mt, on joka tapauksessa vielä kaukana *Hii-letön liikenne 2045* -hankkeen ja fossiilittoman liikenteen tiekartan päästötavoitteista,

joten niihin nähden tarvittaisiin huomattavia lisäpolitiikkatoimia. Voimakkaamman teknologisen muutoksen ansiosta TIMES-mallin tuottaman WAM-päästöuran voi arvioida lähestulkoon saavuttavan liikenteen hiilettömyystavoitteen 0,3 Mt:n hiilidioksidin kokonaispäästömäärällä vuonna 2045. ALIISA-WAM jää selvästi kauemmas tavoitteesta ja päättyy vuonna 2045 suunnilleen 10 kertaa niin suureen päästötasoon (3 Mt).

Rakennusten tilojen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden energiankulutuksen mallinnuksen lähtökohtana olivat skenaariossa uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen toimeenpannut energiatehokkuusvaatimukset ja tuet. Vanhan rakennuskannan nykyinen Tilastokeskuksen tietojen mukainen hyötyenergiankulutus on laskelmassa kohdistettu tilastojen mukaisille rakennuskannan kerrosaloille. Tilastojen mukainen käyttöveden lämmitysenergia on jaettu rakennuksille asuntoväestön suhteessa. Asuin- ja palvelurakennuskannan kehitysarviot on esitetty aiemmin luvussa 3.10.

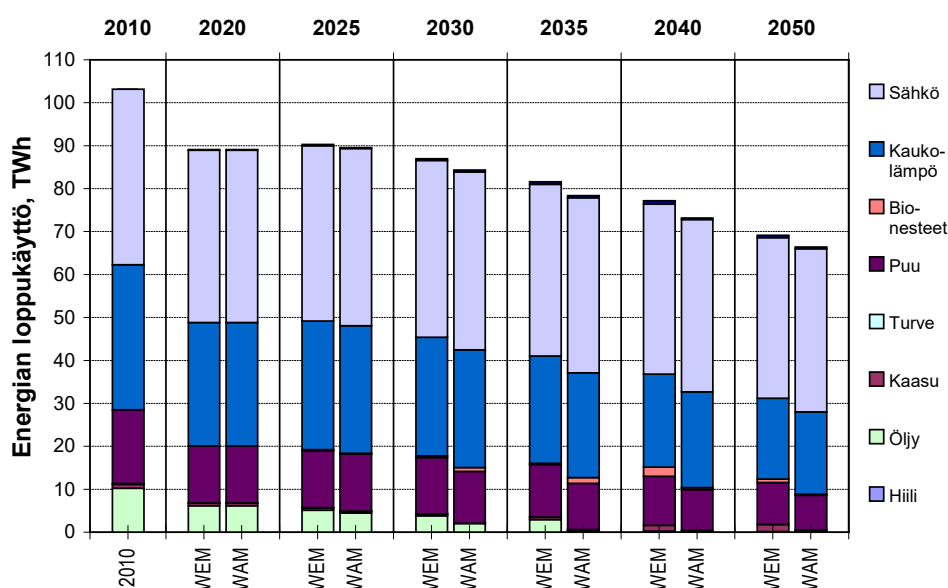
Vanhojen rakennusten arvioiduissa hyötyenergian ominaiskulutuksen muutoksissa on otettu huomioon korjauksilla ja kunnossapidolla saatava energiatehokkuuden paranus sekä ilmastonmuutoksesta johtuva tilojen lämmöntarpeen vähentyminen. Korjausten vaikuttavuudessa on otettu lisäksi huomioon mm. korjausrakentamisen energiatehokkuusvaatimukset sekä energiatehokkuuskorjauksiin osoitettu ARAn kautta jaettava tuki. Ominaiskulutuksen muutoksen oletukset olivat samat kuin EPBD artiklan 2a mukaisessa Suomen korjausrakentamisen strategiassa. Uudisrakennusten osalta ominaiskulutusten lähtökohtana olivat energiatodistusrekisteristä poimittujen, vuoden 2020 tai sen jälkeen valmistuviksi ilmoitettujen uudisrakennusten lämmitysenergian kulutus, sekä ilmaston lämpeneminen. Käyttöveden lämmityksen osuus on arvioitu standardikulutuksen mukaan. Jäähdytyksen tarve kasvaa, mutta ei kompensoi lämmitystarpeen laskua. WAM-skenaariossa energiatehokkuudelle asetettuja vaatimuksia on oletettu entisestään tiukennettavan.

WEM-skenaarion tulosten mukaan asumisen ja palveluiden energian loppukulutus laskee merkittävästi vuoteen 2050 mennessä (Kuva 20). Vähennykseen vaikuttavina tekijöinä ovat erityisesti rakennuskannan varsin maltillinen kasvu, korjausrakentamisella saavutettava energiatehokkuuden paraneminen sekä uudisrakentamisen energiatehokkuusstandardit. WAM-skenaarion tuloksissa energian loppukulutuksen tehostumista näkyy huomattavimmin jo 2030–2040, jolloin päästötavoitteet tiukentuvat voimakkaimmin. Vuoteen 2050 mennessä tehokkuusparannukset WEM-skenaarioon verrattuna kuitenkin hieman tasoittuvat. Viime vuosien kehityksen osalta on muistettava että vuosi 2010 oli poikkeuksellisen kylmä vuosi ja 2020 ennätyslämmin.

Taakanjakosektorilla myös maa- ja metsätalouden, rakennustoiminnan ja muiden työkonoiden energiakäytöstä aiheutuu huomattavat kasvihuonekaasujen päästöt. Näiden sektorien energiankulutus on nykyisin valtaosin työkonoiden moottoripolttoaineita, ku-

ten voidaan nähdä kuvasta 21. Esimerkiksi vuonna 2017 maatalousrakennusten ja viljasiilojen lämmitykseen kului öljyä noin 1,1 TWh, maatalouden työkoneisiin noin 3,8 TWh, rakennustoiminnan työkoneisiin noin 4 TWh ja muihin työkoneisiin noin 2 TWh. Fossiilisten polttoaineiden ja turpeen kulutuksen aiheuttamat hiilidioksidin kokonaispäästöt ovat olleet näillä sektoreilla yhteensä noin 3 Mt:n tasolla.

Kuva 20. Asumisen ja palveluiden energian loppukulutus WEM- ja WAM-skenaarioissa.

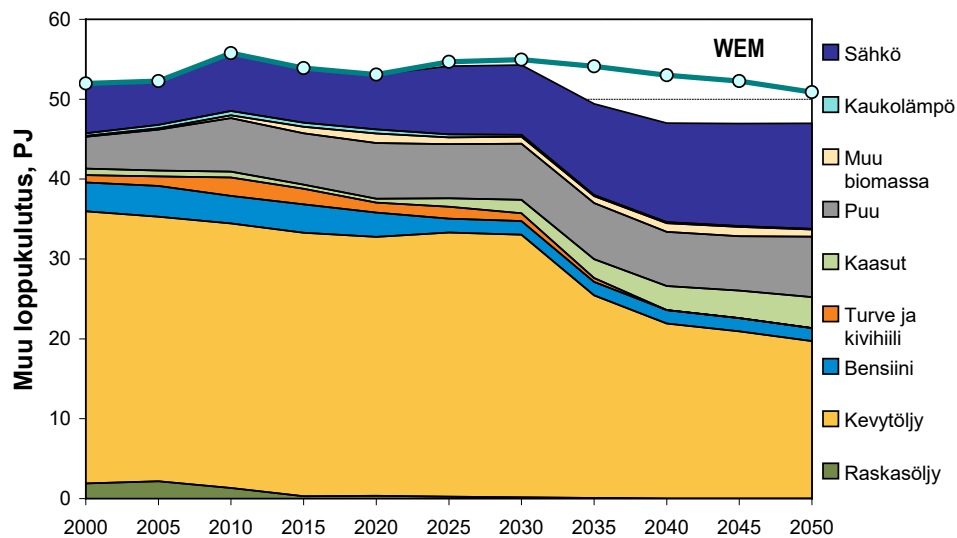


Työkoneiden päästöt käsittävät monenlaisten ajettavien ja siirrettävien työkoneiden dieselöljyn ja bensiinin kulutuksen aiheuttamat päästöt. Työkoneista suurin osa sijoittuu maa- ja metsätalouteen ja rakennustoiminnan sektoreille. WEM- ja WAM-skenaarioiden mallilaskelmissa sekä maa- ja metsätalouden että rakennustoiminnan työkonekäytön kysynnän oletettiin kehittyvän näiden sektorien tuotannon volyymin kehitykseen sidottujen muutuskertoimien mukaan. Maatalouskoneiden osalta mallinnuksessa otettiin lisäksi erikseen huomioon energiatehokkuuden paraneminen moottori- ja voimansiirtotekniikan tavanomaisen kehityksen myötä.

Työkoneiden WEM-skenaariossa on mukana lain mukainen dieselpolttoaineen **sekoitelvelvoite**, joka nousee 10 %:iin vuonna 2030. WAM-skenaariossa jakeluelvoitetta oletettiin nostettavan 30 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi WAM-skenaariossa oletettiin kevytöljyn verotuksen korotus sekä maatalouden valmisteverojen palausten poisto. Työkoneiden energiatehokkuutta voidaan lisäksi parantaa muun muassa niiden käytön optimoinnilla, hybridiratkaisuilla ja sähköistämällä. Pelkästään työmenetelmät ja ajotavat vaikuttavat merkittävästi energian kulutukseen, ja hybridikäytössä

polttomoottoria voidaan käyttää parhaalla mahdollisella toiminta-alueella ja hyödyntää myös monesti pääosin hukkaan menevää potentiaalienergiaa.

Kuva 21. Maa- ja metsätalouden, rakennustoiminnan ja muiden työkonien energian loppukulutus WEM- ja WAM-skenaarioissa (WAM energialähteittäin).



Koska tehdyissä WAM-mallilaskelmissa otettiin kuitenkin huomioon ainoastaan jakeluvelvoitteen ja energiaverotason nosto sekä oletettu markkinaehtoinen sähköistyminen, voitaisiin työkonien päästöissä arvioida olevan lisävähennyspotentiaalia koneiden käytön optimoinnilla ja hybridisoinnilla. Potentiaalin hyödyntäminen edellyttänee kuitenkin sellaisia ohjaavia politiikkatoimenpiteitä, joiden tässä mallitarkastelussa ei oletettu kuuluvan WAM-skenaarion politiikkatoimiin. Tarkempi analyysi vähentämispotentiaaleista edellyttäisi myös yksityiskohtaista laiteryhmäkohtaista tarkastelua, jossa otetaan huomioon eri koneiden tyypilliset käyttötavat ja kuormituksen vaihtelu.

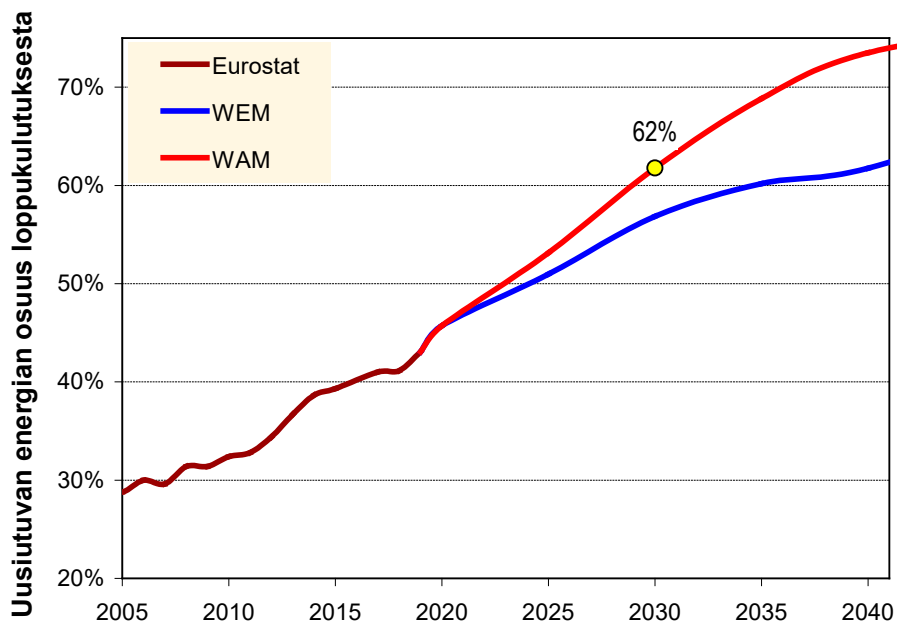
Uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta on puolestaan esitetty kuvassa 22. EU:n laskentasääntöjen mukaan laskettu energian loppukulutus nousee jo WEM-skenaariossa varsin tasaisesti ja saavuttaa noin 56 %:n tason vuonna 2030. Osuus ylittää siten jo WEM-skenaariossa aiemman tavoitteen, jonka mukaan uusiutuvan energian osuuden tulee nousta 2020-luvulla yli 51 %:iin energian loppukulutuksesta.

WAM-skenaarioissa uusiutuvan energian osuus nousee huomattavasti WEM-skenaariota nopeammin, sillä vuonna 2030 se ylittää jo selvästi 60 %:n tason ja nousee vuoteen 2050 mennessä noin 80 %:iin. Suomelle komission mahdollisesti asettama tiukennettu uusiutuvan energian osuuden EU-tavoite (I. Suomen osuus EU:n uusiutuvien tavoitteesta), joka on arvioitu noin 60 %:n tasolle vuonna 2030, ylittynee siten ilmeisen

hyvin WAM-skenaariossa. Vuoden 2030 jälkeen uusiutuvan osuus kasvaa hiilineutraalisuustavoitteen vuoksi varsin nopeasti myös vuosina 2030–2040, mutta sen jälkeen osuuden kehitys tasaantuu vuoteen 2050 mennessä lähelle realistisesti saavutettavissa olevaa enimmäistasoa (ydinvoima ja jätteiden energiakäyttö huomioon ottaen).

Uusiutuvista energialähteistä määrällisesti eniten kasvaa puuperäisen bioenergian käyttö, ja lisäys kohdistuu voimakkaimmin metsähakkeeseen ja metsäteollisuuden jäteliemiin. Bioenergiaa aletaan tuottaa lisäksi nykyistä laajemmin maatalouden sivutuotteista, suurelta osin biokaasuna, mutta jonkin verran myös energiakasveista. Tuulivoiman tuotannon lisäys jatkuu WAM-skenaariossa voimakkaana vuoteen 2040 asti, jonka jälkeen aurinkoenergia nousee nopeimmin uusiutuvan energian osuutta kasvattavaksi energialähteeksi. Näiden lisäksi lämpöpumppujen ympäristöstä tuottama lämmitys- ja jäähdytysenergia tuovat merkittävän osan uusiutuvan energian lisäyksestä, kuten voitiin nähdä edellä kuvasta 12. Uusiutuvan energian käytön voimakas lisääntyminen heijastuu lähes suoraan myös energiaomavaraisuuteen, jolloin omavaraisuus on joitakin prosenttiyksikköjä uusiutuvan osuutta korkeampi.

Kuva 22. Uusiutuvan energian laskennallinen osuus energian loppukulutuksesta WEM- ja WAM-skenaarioissa 2000–2050.

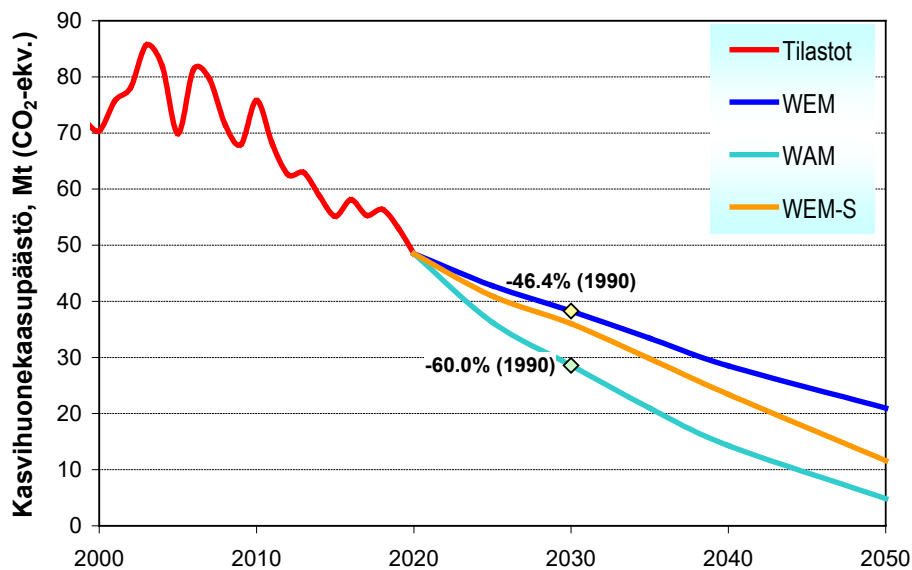


5 Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys

5.1 Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys

Kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärä vähenee WEM-skenaariossa vuoden 2020 jälkeen suunnilleen samassa tahdissa kuin 2000-luvun alkuvuosikymmeninä keskimäärin, mutta WAM-skenaarion tavoitteet edellyttävät vielä selvästi nopeammin laskevaa päästöuraa (Kuva 23). Ennakkotietojen mukaan päästöjen kokonaismäärä oli vuonna 2020 noin 48,5 Mt (SVT 2021), mikä on jo 32 % vähemmän kuin vertailuvuonna 1990. WAM-skenaarioin päästöura alkaa erkaantua WEM-skenaariosta selvästi jo 2020-luvulla, siten että kokonaispäästöjen vähennys on vuonna 2030 WEM-skenaariossa noin 46,4 % ja WAM-skenaariossa 60 % vuoden 1990 tasosta. Suomi ylittää siten jo WEM-skenaariossa EU:n yhteisen vuotta 2030 koskevan nykyisen tavoitteen, eli 40 %:n päästönvähennyksen. Koska perusurassa on käytetty Euroopan komission referenssiskenaarion oletuksia päästöoikeuksien hintojen kehityksestä (ks. Kuva 1, EC 2020), päästöt vähenevät myös WEM-skenaariossa vuoden 2030 jälkeen verrattain tasaisesti ja päättyvät noin 21 miljoonan tonnin tasolle vuoteen 2050 mennessä, mikä vastaa jo varsin tuntuva, 70 %:n vähennystä vuoteen 1990 verrattuna.

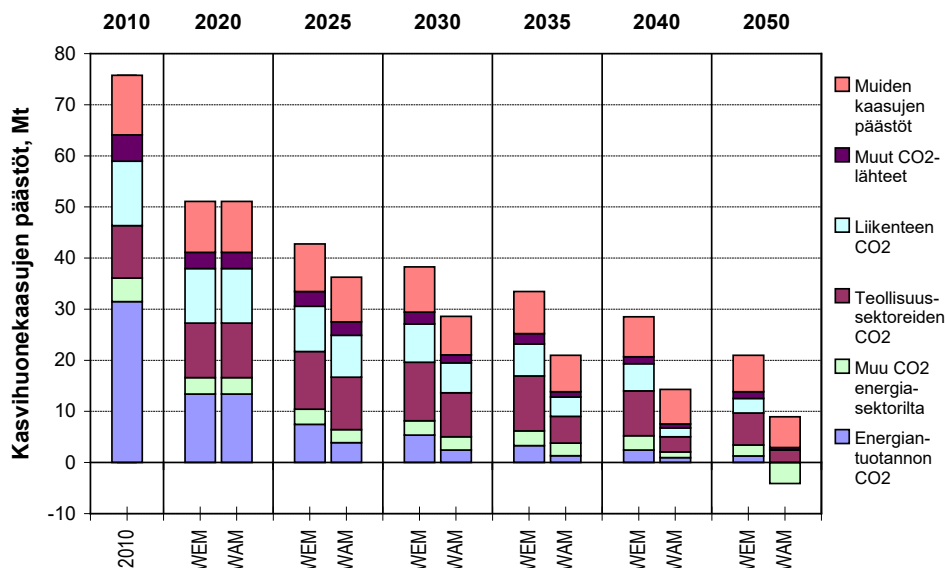
Kuva 23. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys WEM- ja WAM-skenaarioissa sekä korkeamman päästöoikeuksien hintakehityksen herkkyytarkastelussa (WEM-S).



WAM-skenaariossa vuodelle 2050 asetettu 90 %:n päästöjen vähentämisen vähimmäistavoite saavutetaan kokonaan kotimaisin toimin ilman joustomekanismien käyttöä, mutta soveltamalla kohtuullisessa määrin myös hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS), mukaan lukien negatiivisia päästöjä tuottava BECCS-teknologia. Vuonna 2050 CCS:n tuoma vähennys on kaikkiaan noin 9 Mt, ja pitkälti sen ansiosta päästöjä vähennetään tulosten mukaan yli 93 % vuonna 2050. Päästöoikeuksien korkea hinta tekee tällöin vähimmäistavoitetta suuremmat lisävähennykset kannattaviksi.

Kasvihuonekaasupäästöjen jakaantumisessa päästölähteiden pääluokkiin (Kuva 24) nähdään vuoteen 2035 saakka päästönvähennysten voimakasta painottumista energiantuotannon sektorille, pääosin sähkön ja lämmön tuotantoon, joissa tehokkaana taloudellisena ohjaustekijänä on päästökauppa ja siinä määräytyvä päästöoikeuksien hinta. Tuntuvia suhteellisia vähennyksiä saadaan kuitenkin myös rakennusten erillislämmityksessä, jossa energiaverotus on ohjaavana tekijänä, sekä F-kaasupäästöissä, joiden vähennyksiin ohjaavat EU-tason haitallisten aineiden käyttörajoitukset ja standardit. WAM-skenaariossa sekä näiden sektorien että myös liikenteen ja työkoneiden päästöt vähenevät WEM-skenaariota selvästi voimakkaammin. Työkoneiden ja lämmityksen irtautumista fossiilisista polttoaineista vauhdittavat WAM-skenaariossa oletetut valmisteverojen sekä biopolttoaineiden sekoitevelvoitteiden korotukset.

Kuva 24. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys pääluokittain skenaarioissa 2010–2050.



Sähköistyminen ja biopolttoaineet ovat päästöjen vähennysten kannalta avainasemassa. Mallin tulosten mukaan esimerkiksi liikenteen sähköistyminen on voimakasta paitsi henkilöautoliikenteessä myös kaksipyöräisissä ajoneuvoissa, sekä vuoden 2040

jälkeen raskaassa tieliikenteessä ja lentoliikenteessä. Sekä laiva- että lentoliikenteessä saadaan lisäksi päästöjen vähennyksiä korvaamalla fossiilisten polttoaineiden käyttöä biopolttoaineilla. Sähköistyminen ja vetyteknologia ovat kuitenkin ne keskeiset teknologiset muutokset, jotka saavat liikenteen päästöt perusennustetta selvästi alemmalle tasolle vuoden 2040 jälkeen. Hiilidioksidipäästöjen lisäksi liikenteen polttoprosesseissa syntyy toki myös metaani- ja N₂O-päästöjä, myös biopolttoaineista, mutta niiden osuus kotimaanliikenteen kokonaispäästöistä on vain noin prosentin luokkaa.

Skenaarioiden tulokset osoittavat selvästi, että teollisuussektoreilla hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on huomattavasti hankalampaa kuin energiatuotannossa, siitäkin huolimatta, että suuri osa teollisuuden päästöistä kuuluu päästökaupan piiriin. WEM-skenaariossa tämä johtuu osin energiaverojen palautuksista energiaintensiiviselle teollisuudelle (jotka poistuvat WAM-skenaariossa), jotka heikentävät energiaverojen ohjaavaa vaikutusta suuressa osassa teollisuuden energiankulutuksesta, mutta osin teollisuuden vaikeasti vähennettävistä prosessipäästöistä. Energiaintensiivinen teollisuus käyttää fossiilisia polttoaineita myös raaka-aineina, ja suuri osa näistä prosessiperäisistä polttoaineiden kulutuksista ei ole lainkaan energiaverotuksen piirissä. WAM-skenaariossa oletetut prosessiteollisuuden teknologiset muutokset, kuten terästeollisuuden vetypelkistys ja petrokemian teollisuuden siirtyminen yhä enemmän uusiutuviin raaka-aineisiin, tuovat helpotusta päästötavoitteiden saavuttamiseen.

Toinen keskeinen päästöjen voimakkaiden vähennysten kannalta hankala sektori on maatalous, jossa merkittäviin kasvihuonekaasupäästövähennyksiin pääseminen edellyttäisi muun muassa voimakkaita turvepeltojen käytön muutoksia ja viime kädessä lähinnä vähentämällä karjataloutta. Maataloussektorin KHK-päästökehitystä on kuvattu tarkemmin Luke:n raporteissa (Maanavilja et al. 2021).

YK:n ilmastosopimuksen mukaisissa kasvihuonekaasujen inventaareissa 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 metsänkulutuksen päästöt
- 5 jätehuolto: kaatopaikat, kompostointi ja jätevesien käsittely
- Lisäksi raportoidaan epäsuorat CO₂-päästöt NMVOC- ja CH₄-päästöistä.

Taulukossa 4 on skenaariotulosten päästötaseet 2010–2050 inventaarioissa noudatetu-
tuin jaotteluin, mutta ilman LULUCF-luokkaa. On huomattava, että erityisesti luokkien
1A1 ja 1A2 välinen raja-
aus on laskentamallissa jonkin verran inventaariosta poikkeava,
joten päästöjen kohdentumista näiden kesken on pidettävä vain suuntaa-antavana.

Taulukko 4. Kasvihuonekaasupäästöjen tase (pl. LULUCF) vuosina 2010–2050, WEM ja WAM.

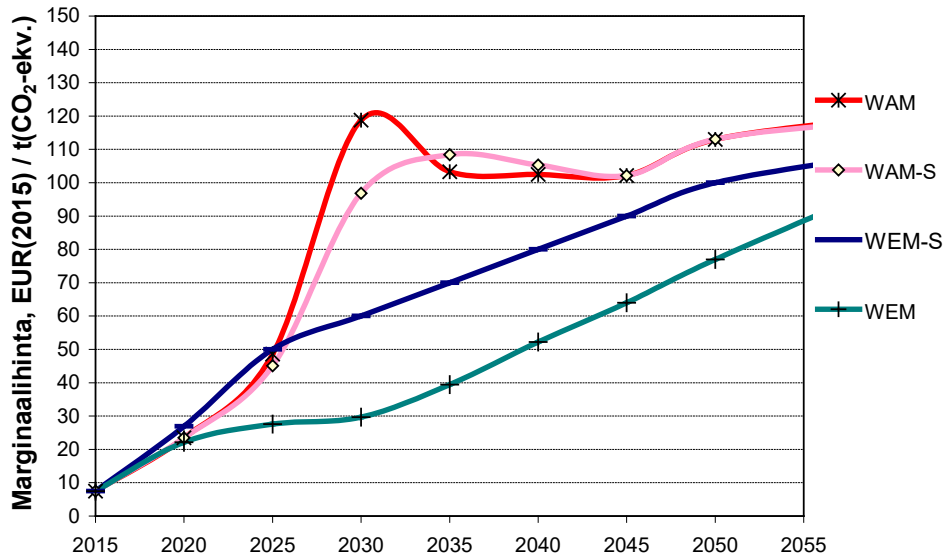
Gg(CO2-ekv.)	WEM-skenaario							
Päästöluokka	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
1A Polttoaineiden polton päästöt	60095	40484	34833	29155	25083	21940	17843	11169
1A1 Energiateollisuus	30947	17780	14015	9655	8015	7454	5947	3592
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10250	6757	6106	6417	5900	5014	4066	2490
1A3 Kotimaan liikenne	12712	10857	10451	8983	7562	6347	5401	2932
1A4 Muut sektorit	4982	4068	3167	2981	2448	2104	1404	1329
1A5 Muu polttoainekäyttö	1204	1022	1094	1118	1158	1022	1025	826
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	142	147	126	104	98	92	88	78
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6166	5803	5654	5678	5553	4184	3571	3104
2A Mineraaliteollisuus	1167	966	1106	1229	1270	1024	1141	1278
2B Kemiaanteollisuus	1058	1208	1201	1372	1506	617	640	885
2C Metalliteollisuus	2439	2142	2061	2066	2094	2028	1353	593
2D Muu kuin energiakäyttö	115	139	149	153	159	181	195	227
2F F-kaasut	1387	1348	1137	859	524	333	242	120
3 Maatalous	6650	6573	6388	6321	6275	6197	6107	5943
3A Kotieläinten ruoansulatus	2095	2115	2309	2209	2172	2110	2052	1985
3B Lannankäsittely	746	752	768	736	686	668	636	518
3D Maatalousmaat	3529	3521	3097	3161	3202	3204	3204	3225
3F Kasvintähteiden poltto pellolla	1	3	3	3	3	3	3	3
3G Kalkitus	277	180	210	210	210	210	210	210
3H Urean levitys	2	2	2	2	2	2	2	2
5 Jätteiden käsittely	2563	2093	1764	1260	1195	961	829	607
5A Jätteiden kaatopaikkasijoitus	2170	1732	1350	875	815	587	462	257
5B Jätteiden biologinen käsittely	143	113	125	100	100	100	100	100
5D Jätevesien puhdistus	250	248	289	285	280	274	267	250
Epäsuorat CO2 päästöt	69	54	76	76	76	76	76	76
Yhteensä pl. LULUCF-sektori	75685	55154	48840	42594	38280	33450	28514	20977
Gg(CO2-ekv.)	WAM-skenaario							
Päästöluokka	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
1A Polttoaineiden polton päästöt	60095	40484	34833	23651	16974	11511	5441	-2928
1A1 Energiateollisuus	30947	17780	14015	6283	5057	3716	295	-4047
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10250	6757	6106	5315	3661	2152	1780	120
1A3 Kotimaan liikenne	12712	10857	10451	8263	5959	3850	1809	144
1A4 Muut sektorit	4982	4068	3167	2772	1642	1065	792	363
1A5 Muu polttoainekäyttö	1204	1022	1094	1018	655	729	764	491
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	142	147	126	102	93	82	72	60
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6166	5803	5654	5160	4769	2918	2591	1979
2A Mineraaliteollisuus	1167	966	1106	960	780	841	1006	1043
2B Kemiaanteollisuus	1058	1208	1201	1372	1539	650	673	609
2C Metalliteollisuus	2439	2142	2061	2066	2094	1102	616	19
2D Muu kuin energiakäyttö	115	139	149	157	171	195	210	244
2F F-kaasut	1387	1348	1137	605	185	131	85	64
3 Maatalous	6650	6573	6387	6062	5711	5570	5360	5067
3A Kotieläinten ruoansulatus	2095	2115	2309	2162	2086	2017	1973	1924
3B Lannankäsittely	746	752	768	611	474	501	468	383
3D Maatalousmaat	3529	3521	3097	3076	2938	2839	2706	2547
3F Kasvintähteiden poltto pellolla	1	3	3	1	1	1	1	1
3G Kalkitus	277	180	210	210	210	210	210	210
3H Urean levitys	2	2	2	2	2	2	2	2
5 Jätteiden käsittely	2563	2093	1764	1196	953	809	748	594
5A Jätteiden kaatopaikkasijoitus	2170	1732	1350	895	666	529	392	244
5B Jätteiden biologinen käsittely	143	113	125	100	100	100	100	100
5D Jätevesien puhdistus	250	248	289	202	187	180	257	250
Epäsuorat CO2 päästöt	69	54	76	80	80	80	80	80
Yhteensä pl. LULUCF-sektori	75685	55154	48840	36250	28580	20970	14290	4850

Päästövähennysten kustannustehokkuutta mitataan yleisesti päästöjen vähentämisen marginaalikustannuksella (Marginal Abatement Cost, MAC), eli rajakustannusta tai -hintaa. Rajahinta kuvaa sitä kustannuksen lisäystä, joka syntyy, kun päästöjä vähennetään yksi yksikkö lisää. Kun järjestelmämallissa on asetettu päästöille rajoite, mallin tuloksena saadaan kyseistä rajoitetta vastaava päästöjen vähentämisen rajahinta, joka kertoo, kuinka paljon järjestelmän kokonaiskustannukset muuttuvat vuodessa, jos päästörajoitetta muutetaan yhden yksikön verran. Mikäli mallin annetaan vapaasti optimoida päästöjen vähennystoimia, se toteuttaa niitä siinä määrin kuin päästöjen vähentämisen yksikkökustannukset jäävät rajahinnan alle. Rajahinta kertoo silloin viimeisen kalleimman käyttöön otetun vähennystoimen yksikkökustannuksen, eli hypoteettisen marginaalisen päästövähennysten tuottajan yksikkökustannuksen. TIMES-mallinnuksen rajahinnat eivät sisällä vaikutuksia LULUCF-sektorille.

Samaan tapaan kuin mallinnettu päästörajoite tuottaa rajahinnan, myös päästökaupasektorilla päästöoikeuksien hinta määrittää marginaalisen kustannuksen päästöjen vähentämiseksi silloin, kun päästöillä ei ole muuta rajoitetta. Taakanjakosektorilla taas marginaalisia kustannuksia on paljon hankalampi laskea luotettavasti, muun muassa päästölähteiden monimuotoisuuden ja yksityisten toimijoiden luonteesta johtuen.

Päästöjen vähentämisen rajahinta heijastaa varsin hyvin tarvittavien toimien vaikeutta ja suoraa kustannusvaikutusta (Kuva 25). Tulosten mukaan vuoden 2030 ja 2035 hiili-neutraaliuteen pyrkivien päästötavoitteiden saavuttaminen nostaisi rajahintaa selvästi oletetun EU:n päästökaupan hintojen arvioitua kehitystä korkeammalle tasolle.

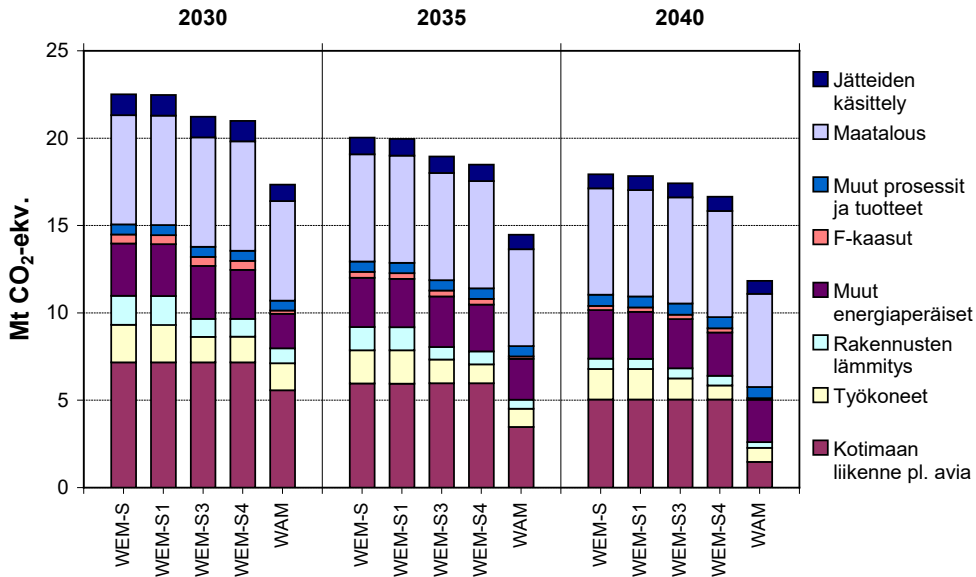
Kuva 25. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen rajakustannus WEM- ja WAM-skenaarioissa 2005–2040, sekä herkkyystarkasteluissa (WEM-S ja WAM-S).



Vuonna 2030 rajahinta nousee noin 120 €/t tasolle WAM-skenaariossa ja noin 100 €/t WAM-S-skenaariossa. Hiilidioksidin talteenoton ja negatiivisten päästöjen ansiosta vuoden 2035 jälkeen rajahinta ei enää nouse vuoden 2030 tasoa korkeammaksi, vaikka päästötavoitteet kiristyvät edelleen.

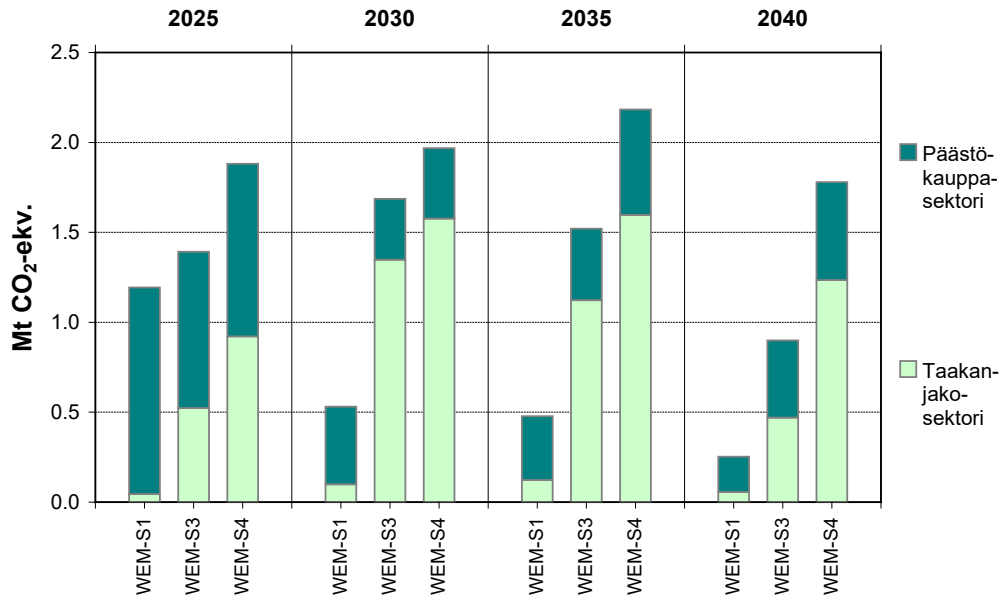
Koska mallinnetussa WAM-skenaariossa päästöille oli asetettu useampia rajoitteita (kokonaispäästöt, taakanjakosektorin kokonaispäästöt, kotimaanliikenteen päästöt) sekä varsin monia muita pakotteita esimerkiksi liikenteessä, malli ei tuota yksikäsitteistä päästöjen rajahintaa, ja eri rajoitteiden rajahintojen tulkinnassa on otettava huomioon myös niiden vuorovaikutus. Kuvassa 25 esitetyt rajahinnat on saatu tuloksista kokonaisrajoitteen sekä taakanjakosektorin rajahinnoista liikennettä lukuun ottamatta, ja raportoimalla niistä korkein. Liikennettä ei tähän rajahintatarkasteluun otettu mukaan, sillä mallin tuottama marginaalikustannus osoittautui siellä monista pakottavista rajoituksista johtuen epäluotettavan heittelehtiväksi (eri käyttövoimien markkinaosuusien pakotetut rajoitteet). Yleisemminkin erilaiset pakotetut muutokset voivat vääristää rajahintoja tapauksesta riippuen kumpaankin suuntaan.

Kuva 26. Taakanjakosektorin päästöt vuosina 2030–2040 jatkotarkasteluissa 1, 3 ja 4, vertailukohtana WEM-S-skenaario ja WAM-skenaario. Laskentatapausten määrittelyt on kuvattu luvussa 3.3.2 WAM-skenaario.



Laskentamallilla tehtiin lisäksi joidenkin WAM-skenaarioon sisällytettyjen politiikkatoimien vaikutuksia koskeva herkkyystarkastelu, käyttäen vertailukohtana WEM-skenaarioin varianttia (WEM-S), jossa päästöoikeuden hinta on oletettu samaksi kuin WAM-skenaariossa. Kuvassa 26 havainnollistettujen tulosten mukaan energiaverojen jo päätetyt muutokset (WEM-S1) eivät tuo merkittäviä päästönvähennyksiä taakanjakosektorille, mutta rakennusten erillislämmityksen tukitoimenpidekokonaisuus sekä jakeluvervoitteen nostaminen 30 %:iin (WEM-S3) saavat aikaan jo melko tuntuva lisävähennyksen erillislämmityksen ja työkoneiden päästöihin tiukentuvien tavoitteiden kannalta kriittisinä vuosina, noin 1,4 Mt vuonna 2030 ja 1,1 Mt vuonna 2035. Lisäksi suunnitellut uudet energiaverojen muutokset (WEM-S4, 10 €/MWh korotus energiasäiltöveroon ja maatalouden veronpalautusten poisto) tuovat myös kohtalaisen lisävähennyksen, joka on tulosten mukaan 0,4 Mt vuonna 2025, 0,5 Mt vuonna 2035 ja 0,8 Mt vuonna 2040. Vuonna 2030 WEM-S4:n toimien lisävaikutus jää kuitenkin 0,25 Mt:n tasolle, mikä johtuu suurelta osin jakeluvervoitteen noston vaikutuksesta, joka on politiikkatoimena tuolloin valtaosin veronkorotusten kanssa päällekkäinen. Kokonaisvaikutukset taakanjako- ja päästökaupparektorin päästöihin on esitetty kuvassa 27, vuotuisten päästöjen vähennyksinä WEM-S-skenaarioon verrattuna.

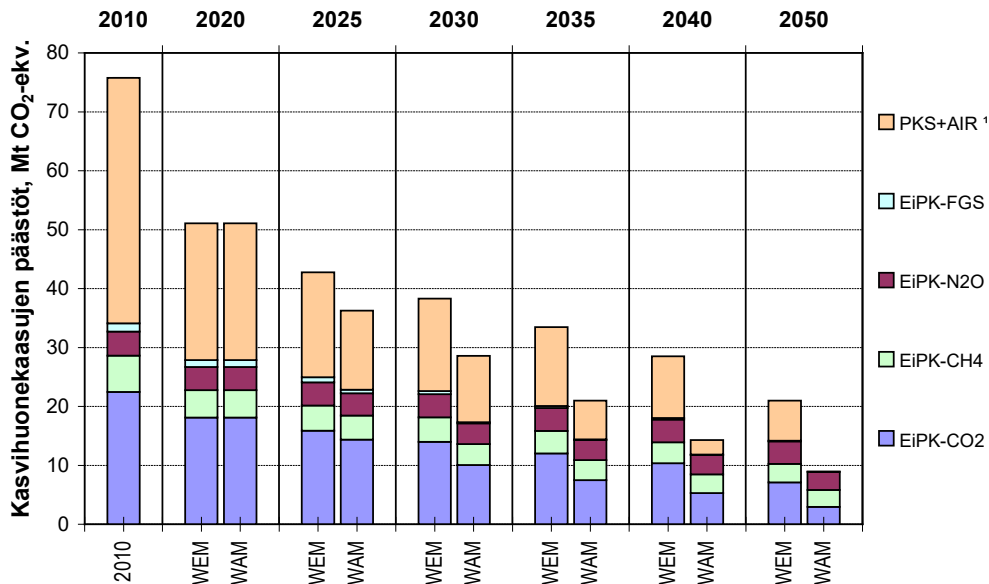
Kuva 27. Jatkotarkasteluiden 1, 3 ja 4 mukaisten WAM-skenaarion politiikkatoimien laskennalliset kokonaisvaikutukset taakanjako- ja päästökauppasektorin päästöihin 2025–2040, vertailukohtana WEM-S-skenaario, jossa päästöoikeuksien hinnat ovat kuten WAM-skenaariossa.



5.2 Taakanjakosektorin päästöjen kehitys

Taakanjakosektorin päästökehitys kuuluu WEM-skenaarion keskeisimpiin tarkastelu-kohteisiin, sillä siihen voidaan erityisesti vaikuttaa kotimaisin politiikkatoimin ja ohjaukskeinoin. Kuva 28 havainnollistaa kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen jakaantumisen päästökauppasektorin ja taakanjakosektorin päästöihin sekä taakanjakosektorin päästöt lisäksi päästölajeittain. Kuvassa 28 on puolestaan esitetty taakanjakosektorin päästöt jaettuna tilastokeskuksen käyttämällä jaottelulla alasektoreihin, ja taulukko 5 esittää vastaavan jaottelun numeroina.

Kuva 28. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys päästökauppasektorilla sekä taakanjakosektorilla päästölajeittain WEM- ja WAM-skenaarioissa 2010–2050.



Mallilaskelmien tulosten mukaan taakanjakosektorin hiilidioksidipäästöt alenevat itse asiassa verrattain tasaisesti vuodesta 2020 aina vuoteen 2050 saakka. Nykyisten politiikkatoimien ohjausvaikutus, joka syntyy pääosin energiaveroista ja sekoitevelvoitteista, näyttää siten pysyvän pitkään kohtuullisen hyvänä. Toki on huomattava, että taakanjakosektorin hiilidioksidipäästöistä noin puolet syntyy kotimaanliikenteestä, joten liikenteen vaikutus taakanjakosektorin päästöjen kehitykseen on keskeinen.

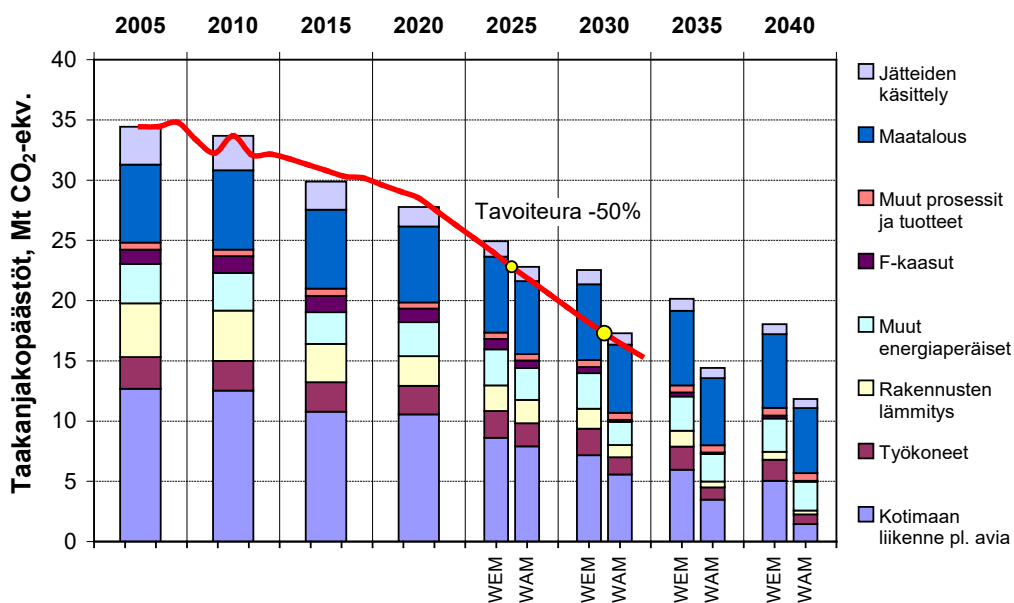
Taakanjakosektorin kokonaispäästöt alenevat WEM-skenaariossa vuoteen 2030 mennessä 22,5 Mt:n tasolle, joka on noin 5,3 Mt suurempi kuin arvioitu uusi 50 %:n vähennystavoite edellyttäisi. Vuoteen 2005 verrattuna päästöt vähenevät ylivoimaisesti eniten kotimaanliikenteessä, jossa vähennys on WEM-skenaariossa 5,5 Mt (43 %) ja WAM-skenaariossa 7,1 Mt (56 %). Liikenteen lisäpäästönvähennys on siten WAM-skenaariossa kokonaisvähennykseen verrattuna selvästi maltillisempi, mikä johtuu oletetusta varsin voimakkaasta sähköistymisestä jo WEM-skenaariossa.

Liikenteen jälkeen suurimmat päästönvähennykset saadaan WEM-skenaariossa aikaan rakennusten lämmityksessä 2,8 Mt ja jätteiden käsittelyssä 2 Mt. WAM-skenaariossa vähennykset kasvavat 3,5 Mt:n ja 2,2 Mt:n määriin. Työkoneiden osalta vuoden 2030 vähennys kasvaa puolestaan WEM-skenaarion 0,5 Mt:n määrästä WAM-skenaarion 1,2 Mt:n määrään. Tulokset osoittavat varsin hyvin öljyn käyttöön kohdistuvien politiikkatoimien merkityksen, joka syntyy pääosin jakeluelvoitteen tason huomattavasta nostosta ja energiaverojen korotuksista.

Kuvassa 29 ja taulukossa 5 esitetty jaottelu osoittaa, että mallinnettujen WEM- ja WAM-skenaarioiden tuottamat päästöurat ovat pääosin hyvin sopusoinnussa sektori-kohtaisten arvioiden kanssa:

- Kotimaanliikenteen päästöt kehittyvät suunnilleen LVM:n perusennusteen mukaisesti vuoteen 2035 saakka.
- Rakennusten lämmityksen päästöt vähenevät vuoteen 2035 mennessä WEM-skenaariossa 60 % vuoden 2015 tasosta 1,3 Mt:n tasolle ja WAM-skenaariossa yli 85 % noin 0,5 Mt:n tasolle.
- Työkoneiden päästöt kehittyvät WEM-skenaariossa suunnilleen TYKO-mallin mukaisesti siten, että päästöt ovat vuonna 2040 likimain TYKO-2019 perusskenaarion sähköistymisvariantin mukaisia (alle 1,8 Mt). WAM-skenaariossa päästöt vähenevät vuodesta 2030 alkaen selvästi nopeammin sekä jakeluvaihteen että sähköistymisen myötä, ja ovat noin 0,8 Mt vuonna 2040.
- Jätehuollon päästöt kehittyvät WEM-skenaariossa Syken arvioiman perusskenaarion mukaisesti, WAM-skenaariossa hieman tätä pienemmiksi.
- F-kaasupäästöt vähenevät WEM-skenaariossa hieman lievemmin kuin Syken laatimassa WEM-kehitysarviossa, WAM-skenaariossa kuten Syken WAM.
- Maatalouden päästöt kehittyvät sekä WEM- että WAM-skenaariossa suunnilleen Luke:n vastaavien kehitysarvioiden mukaisesti (hieman suuremmin päästönvähennyksin lähinnä mallin valitsemien lannankäsittelymuutosten seurauksena).

Kuva 29. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys taakanjakosektorilla WEM- ja WAM-skenaarioissa 2005–2040.



Taulukko 5. Taakanjakosektorin alasektorien päästöt WEM-skenaariossa (Mt CO₂-ekv.).

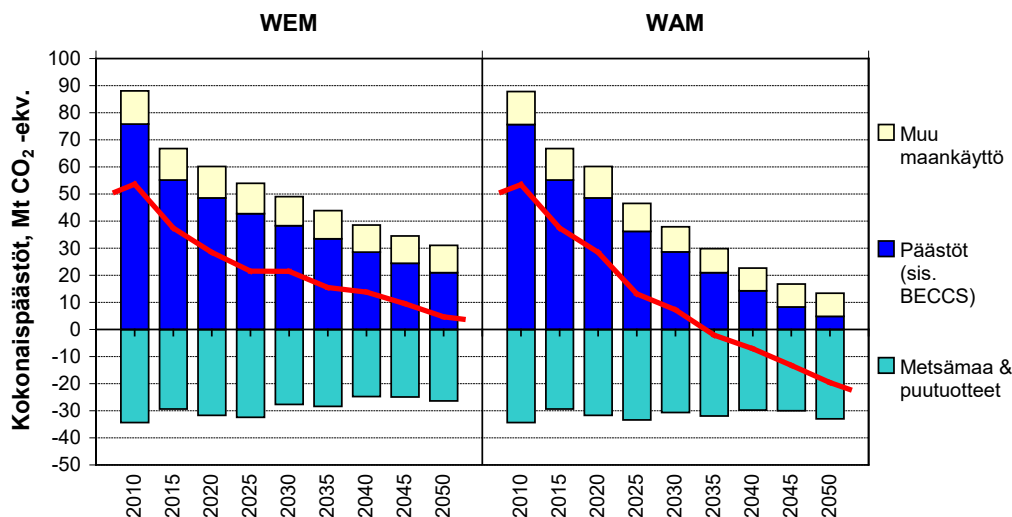
WEM – Sektorit	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Kotimaan liikenne pl. avia	12.7	12.5	10.8	10.5	8.6	7.2	6.0	5.0
Työkoneet	2.6	2.5	2.4	2.4	2.2	2.1	1.9	1.8
Rakennusten lämmitys	4.5	4.2	3.2	2.4	2.1	1.7	1.3	0.6
Muut energiaperäiset	3.3	3.1	2.6	2.8	3.0	3.0	2.8	2.7
F-kaasut	1.2	1.4	1.4	1.1	0.9	0.5	0.3	0.2
Muut prosessit ja tuotteet	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
Maatalous	6.5	6.6	6.5	6.3	6.3	6.3	6.2	6.1
Jätteiden käsittely	3.1	2.9	2.3	1.8	1.3	1.2	1.0	0.8
Taakanjakosektori yhteensä	34.4	33.7	29.9	27.8	24.9	22.5	20.1	18.0
Päästökaupasektori	35.5	42.1	25.3	20.6	17.9	15.8	13.5	10.6
Kaikki yhteensä	69.9	75.8	55.2	48.5	42.8	38.3	33.5	28.5
WAM – Sektorit	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Kotimaan liikenne pl. avia	12.7	12.5	10.8	10.5	7.9	5.6	3.5	1.5
Työkoneet	2.6	2.5	2.4	2.4	1.9	1.4	1.0	0.8
Rakennusten lämmitys	4.5	4.2	3.2	2.4	1.9	1.0	0.5	0.3
Muut energiaperäiset	3.3	3.1	2.6	2.8	2.7	1.9	2.3	2.4
F-kaasut	1.2	1.4	1.4	1.1	0.6	0.2	0.1	0.1
Muut prosessit ja tuotteet	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
Maatalous	6.5	6.6	6.5	6.3	6.1	5.7	5.6	5.4
Jätteiden käsittely	3.1	2.9	2.3	1.8	1.2	1.0	0.8	0.7
Taakanjakosektori yhteensä	34.4	33.7	29.9	27.8	22.8	17.3	14.4	11.8
Päästökaupasektori	35.5	42.1	25.3	20.6	13.5	11.3	6.6	2.5
Kaikki yhteensä	69.9	75.8	55.2	48.5	36.3	28.6	21.0	14.3

5.3 Kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien kehitys

Kasvihuonekaasuinventaarioiden nykyisten laskentasääntöjen mukaan polttoaineiden polton hiilidioksidipäästöistä otetaan huomioon vain fossiilisten polttoaineiden, turpeen ja sähköpolttoaineiden päästöt, mutta metaanin ja N₂O-päästöt otetaan huomioon myös bioenergian konversiossa. Bioenergian polton hiilidioksidipäästöjä ei oteta päätötaseessa huomioon, vaan sen sijaan hiilivarantojen muutokset raportoidaan maankäytön ja maankäytön muutoksen pääluokassa (LULUCF). TIMES-VTT -järjestelmämallilla tehtyjen integroitujen mallitarkastelujen perusteella Suomen KHK-päästöt (ilman LULUCF-päästöjä) olisivat WEM-skenaariossa vuonna 2030 yhteensä noin 38,3 Mt CO₂-ekv. ja laskisivat vuoteen 2035 mennessä tasolle 33,5 Mt. WAM-skenaariossa kokonaispäästöt olisivat 60 %:n kokonaispäästötavoitteen mukaisesti 28,6 Mt vuonna 2030 ja vuonna 2035 hiilineutraaliustavoitteen mukaisesti vajaat 21 Mt CO₂-ekv.

Alla on esitetty KHK-päästöjen ja poistuminen yhteenlaskettu nettokehitys, kun on huomioitu Luken alustavat arviot LULUCF-sektorin kehityksestä (Kuva 30). Luonnonvarakeskuksen arvioiden mukaan LULUCF-sektorin nettonielu päätyisi WEM-skenaariossa vuonna 2035 noin 18 Mt CO₂-ekv. tasolle, joten päästöjen kanssa yhteenlaskettuna KHK-päästöjen ja -poistumien nettomäärä olisi runsaat 15 Mt CO₂-ekv. Tämä kuvaa ns. ”päästökulua”, jonka osalta tarvitaan uusia ohjaustoimia. WAM-skenaariossa nielujen vahvistaminen ja muut tarkastellut WAM-toimet kasvattavat nettonielua noin 23 Mt:n tasolle, joten muilla toimin kurottava ”päästökulua” supistuu WAM-skenaariossa noin 10 Mt:n määrään.

Kuva 30. Kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien kehitys WEM- ja WAM-skenaarioissa 2010–2050.



Toinen merkittävä huomio WEM-tulosten osalta liittyy taakanjakosektorin kehitykseen, jonka osalta EU:n säädöspakettiluonnoksessa Suomelle asettama tavoite (50 % vuoden 2005 KHK-päästöihin verrattuna) vuodelle 2030 ei toteudu ilman merkittäviä lisätoimia, sillä lisäpäästövähennyksiä tarvittaisiin noin 5,2 Mt CO₂-ekv. TIMES-mallitarkastelun perusteella kotimaanliikenteen kasvihuonekaasupäästöt vähenisivät WEM-skenaariossa jonkin verran LVM:n perusennusteen ALIISA-laskelmaa enemmän, noin 43 % vuoteen 2030 mennessä. Tämäkin jää selvästi jälkeen LVM:n vähähiilitiekartassa tavoitteeksi asetetusta 50 %:n vähennyksestä, joka toisaalta vastaa myös vuonna 2017 julkaistun KAISU:n (YM 2017) tavoitteita.

WEM-skenaariion tuloksista nähdään, että nykyisillä WEM-politiikkatoimilla hiilineutraalisuutta ei saavuteta ennen vuotta 2050 ja silloinkin ainoastaan, jos LULUCF-nettonielut ovat vähintään noin 30 Mt:n (CO₂-ekv.) tasolla. WAM-skenaariion voimakkaam-

milla toimilla ja ohjauskeinoilla hiilineutraalisuus sen sijaan voidaan saavuttaa tavoitteen mukaisesti vuonna 2035, mutta tämä edellyttää merkittävän nopeaa KHK-päästöjen vähentämistä erityisesti jaksolla 2025–2035 ja lisäksi sitä, että metsien hiilinielut saadaan pysymään ainakin suunnilleen nykyisellä tasolla. Lisäksi on huomattava, että esimerkiksi fossiilittoman liikenteen tavoitteiden saavuttamiseksi oletetut ohjaustoimet eivät VTT:n ALIISA-laskelmien mukaan näytä olevan riittäviä.

Päästövähennysurien eroavuudet selittyvät pääosin skenaarioiden taustalla olevista politiikka- ja teknologiaoletuksista. Lähtöoletukset liittyen Suomen metsäteollisuuden kehitykseen vaikuttavat puolestaan keskeisesti LULUCF-sektorin nettonielujen kehitykseen ja sitä myöden myös tarvittavaan KHK-päästövähennysmäärään, tai vaihtoehtoisesti tarvittaviin nielujen vahvistamistoimiin, jotta hiilineutraalisuus voitaisiin saavuttaa. Pidemmällä aikavälillä teknologiaoletuksista ehkä merkittävin liittyy mahdollisuuksiin hyödyntää hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologiaa (CCS) ja niihin liittyvää negatiivisten päästöjen tuotantoa, jotka skenaarioiden määrittelyiden mukaan voivat tulla WAM-skenaariossa käyttöön pääsääntöisesti vasta vuoden 2035 jälkeen. Nämä teknologiat ovat tulosten mukaan merkittävässä roolissa 2050 mennessä, mikä edellyttäisi myös niitä koskevan sääntely- ja valvontajärjestelmän luomista.

6 Johtopäätökset

6.1 Poliittikatoimien vaikuttavuus

Raportissa esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että Sanna Marinin hallitusohjelmassa asetettu hiilineutraalisuustavoite vuonna 2035 on mahdollista saavuttaa, mutta vaatii johdonmukaista ja pitkäjänteistä ilmasto- ja energiapolitiikkaa, joiden avulla voidaan edistää oikeudenmukaista siirtymää kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Edellytyksenä on riittävän nopea infrastruktuurin uusiutuminen ja vaadittavat investoinnit. WEM-skenaariotarkastelut osoittavat, että nykyisillä toimilla (eli 31.12.2019 mennessä päätetyillä) ei päästä nykyiseen 39 % taakanjakosektorin päästövähennystavoitteeseen (vertailuvuosi 2005) eikä myöskään liikenteelle asetettuun 50 % vähennystavoitteeseen vuonna 2030 (vertailuvuosi 2005). Hallitusohjelmaan kirjattu turpeen energiankäytön vähintään puolittaminen vuoteen 2030 mennessä sen sijaan toteutuu jo WEM-skenaariossa. Turpeen energiakäytön nopea väheneminen, tuulivoiman ja muun uusiutuvan energian investoinnit sekä ydinvoimakapasiteetin kasvu ennakoivat, että kokonaispäästökehitys on lasku-uralla jatkossa myös nykytoimin.

WAM-skenaariossa ehkä keskeisin haaste liittyy myös vuoden 2030 päästötavoitteisiin, eli 60 prosentin KHK-päästövähennystavoitteeseen (vertailuvuosi 1990) sekä 50 prosentin taakanjakosektorin KHK-päästötavoitteeseen (vertailuvuosi 2005). Mikäli taakanjakosektorin 50 % tavoite pystytään saavuttamaan ja päästöoikeuden hinta pysyy nykyisellä noin 60 €/t CO₂ -hintatasolla, päästöoikeuden hintaohjaus voisi olla riittävä 60 % KHK-päästövähennystavoitteen saavuttamiseksi. Kannattaa kuitenkin huomata, että skenaariotarkasteluissa on oletettu, että teollisuus investoi merkittävässä määrin päästöjen vähentämiseen, eli fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen sähköllä ja uusiutuvalla energialla, mukaan lukien vety. TIMES-VTT-mallitarkastelujen perusteella vuoden 2030 taakanjakosektorin tavoite on kuitenkin erittäin haasteellinen Suomelle ja edellyttää KHK-päästövähennysten toteutumista kaikilla taakanjakosektorin sektoreilla. HIISI-mallinnusten perusteella WEM- ja WAM -skenaarioiden KHK-päästöjen väliseksi eroksi, eli niin sanottu päästökuliksi mallinnuksessa saatiin:

- Kasvihuonekaasupäästöille (pl. LULUCF): 2030 9,7 Mt CO₂-ekv.; 2035 12,5 Mt CO₂-ekv.
- Kasvihuonekaasupäästöille (ml. LULUCF): 2030 14,0 Mt CO₂-ekv.; 2035 13,5-15,5 Mt CO₂-ekv.
- Taakanjakosektorille: 2030 5,2 Mt CO₂-ekv.; 2035 5,6 Mt CO₂-ekv.

Kun tarkastellaan päästökulua ottaen myös LULUCF-sektori huomioon, nähdään, että se on suurempi kuin tarkastellessa ainoastaan KHK-päästötasetta. Vuoden 2035 osalta LULUCF-sektorin mallinnuksessa sille asetettu nettonielutavoite 21 Mt CO₂-ekv. ylittyi 2 Mt CO₂-ekv. -määrällä, jonka vuoksi vuodelle 2035 on esitetty vaihteluväli perustuen LULUCF-sektorille asetettuun tavoitteeseen ja laskennallisen arvioon WAM-skenaariossa.

Tässä raportissa on esitetty HIISI-hankkeen WEM- ja WAM -skenaarioiden keskeiset tulokset nykyisten politiikkatoimien ja jo päätetyiden uusien toimien (tilanne ennen 31.8.2021) vaikutuksista ilmasto- ja energiatavoitteiden saavuttamiseen vuosina 2030, 2035, 2040 ja 2050. Kannattaa myös huomata, että WAM-skenaario sisälsi lisäksi ohjaustoimia, joista ei ole hallituksen päätöksiä. Erityisesti valmisteveroihin ja -palautuksiin oletetut uudet muutokset (l. lämmityspolttoaineiden tuplaindeksikorotus, rakennusten erillislämmityksen ja työkoneiden valmisteverojen korotus sekä maatalouden valmisteverojen palautuksista luopuminen) eivät näytä nykytiedon perusteella todennäköisiltä ohjaustoimilta. Hintaohjauksen on kuitenkin useassa tutkimuksessa todettu olevan tehokas toimi päästöjen vähentämisessä. Toisaalta tukipolitiikkaa tarvitaan kannustamaan investointeihin kotimaassa, mutta myös tukitoimien tulisi olla johdonmukaista ja riittävää ilmasto- ja energiatavoitteiden saavuttamiseksi. HIISI-hankkeessa laaditut skenaariolaskelmat luovat kuitenkin erinomaisen pohjan laatia tarkemmat vaikutusarviot sille politiikkakokonaisuudelle, josta hallitus on päättänyt. Lisäksi EU:n uusi säädösehdotuspaketti voi tuottaa uusia tarpeita laskelmien päivitykselle. Lähtökohtaisesti EU:n asettamat tavoitteet ja toimet niiden saavuttamiseksi tulisi olla johdonmukaiset myös kansallisen ilmasto- ja energiapolitiikan kanssa.

Tulokset osoittavat myös, että tarkastellut uudet, aiempia selvästi tiukemmat päästötavoitteet edellyttävät huomattavia energiajärjestelmäinvestointeja jo ennen vuotta 2030. Taulukossa 6 on havainnollistettu investointien määrää viisivuotisperiodeittain (mrd. €₂₀₁₅) liikennesektoria lukuun ottamatta, ja taulukosta nähdään, että WAM-skenaariossa investointeja tarvitaan esimerkiksi vuosina 2031–2035 yli 50 mrd. euron arvosta, ja WEM-skenaarioon verrattuna lisäinvestoinnit ovat lähes 10 mrd. euroa. Onkin selvää, että tiukkojen päästötavoitteiden saavuttaminen edellyttää WAM-skenaariossa oletettujen politiikkatoimien ja ohjauskeinojen lisäksi riittävää ilmastotietoisuuden heijastumista kuluttajien valintoihin ja muiden toimijoiden investointeihin. Toisistaan poikkeavien liikennesuoriteoletusten vuoksi liikennesektorin investointeja ei voi mielekkäästi verrata WEM- ja WAM-skenaarioiden välillä.

Taulukko 6. Energiajärjestelmäinvestoinnit viisivuotisperiodeittain 2026–2040, mrd. €(2015).

Sektorit	WEM			WAM			Erotus WEM–WAM		
	2026– 2030	2031– 2035	2036– 2040	2026– 2030	2031– 2035	2036– 2040	2026– 2030	2031– 2035	2036– 2040
Sähkö- ja lämpö	4.9	11.5	3.3	6.3	17.5	11.1	1.4	6.0	7.8
Muu energiasektori	0.8	0.4	0.9	2.8	2.5	1.7	2.0	2.1	0.7
Metsäteollisuus	8.9	8.2	8.4	9.0	8.2	8.4	0.1	0.0	0.0
Perusmetalli	1.3	2.5	3.1	1.1	2.4	2.5	-0.1	-0.2	-0.6
Muu teollisuus	2.8	3.3	3.0	3.3	3.7	3.2	0.5	0.4	0.2
Muut sektorit	13.2	15.9	20.3	13.5	15.9	20.3	0.3	-0.1	0.0
Yhteensä	32.7	42.3	39.5	37.2	50.8	47.8	4.5	8.6	8.3

6.2 Integroidun ja sektoritarkasteluiden eroista

Työssä tehtiin yksityiskohtaisia sektorikohtaisia analyyskejä, joiden lähtöoletuksia ja tuloksia hyödynnettiin mahdollisimman hyvin integroidussa järjestelmätarkastelussa. Sektorikohtaisten analyysien päästötulokset poikkeavat kuitenkin jossain määrin integroidun tarkastelun vastaavista, ja poikkeamat luonnollisesti tuovat esiin tarkastelujen epävarmuuksia. Koska sektorimallit ovat varsin yksityiskohtaisia, niiden tulosten voi lähtökohtaisesti odottaa olevan sektorin kehityksen osalta luotettavampia kuin eri sektorit jonkin verran karkeammin kuvaava integroitu kokonaismalli. Toisaalta sektorimallit eivät kykene ottamaan huomioon kytkentöjä muihin sektoreihin ja siten muun muassa energian hintojen kehitystä kussakin politiikkaskenaariossa, joten integroidun mallin tulokset ovat kokonaisuoptimoinnin kannalta perustellumpia. Lisäksi integroitu malli kykenee valitsemaan kustannustehokkaimmat päästönvähennyskeinot, jotka voivat siten kohdistua sektoreille eri tavalla kuin sektorimalleissa on oletettu.

Liikenteen osalta yksityiskohtaiset skenaariolaskelmat on tehty ALIISA-mallin avulla. Integroidussa tarkastelussa käytettiin samoja lähtötietoja muun muassa liikennesuoritteiden kysynnästä, sähkö- ja kaasujoneuvojen markkinaosuuksien oletetuista vähimmäistasoista ja sähköhenkilöautojen ajokilometreistä. ALIISA-mallin ja integroidun tarkastelun päästötulosten välillä on kuitenkin selviä eroja, jotka ovat tiivistetysti seuraavat (kotimaanliikenne ilman lentoliikennettä ja kalastusaluksia):

- WEM-skenaariossa kotimaanliikenteen päästöt ovat ALIISA-mallin mukaan 7,4 Mt vuonna 2030 ja 6,6 Mt vuonna 2035, ja vastaavasti TIMES-mallin tuloksissa ne ovat 7,2 Mt vuonna 2030 ja 6,0 Mt vuonna 2035. Päästötason ero on siten noin 0,2 Mt vuonna 2030 ja noin 0,6 Mt vuonna 2035.
- WAM-skenaariossa kotimaanliikenteen päästöt ovat ALIISA-mallissa 6,5 Mt vuonna 2030 ja 5,0 Mt vuonna 2035, ja vastaavasti TIMES-mallissa ne ovat 5,6 Mt vuonna 2030 ja 3,5 Mt vuonna 2035. Päästötason ero on siten noin 0,9 Mt vuonna 2030 ja 1,5 Mt vuonna 2035.

Päästöjen erot aiheutuvat monista eri tekijöistä, mutta WEM-skenaariossa ne ovat vielä melko pieniä. Esimerkiksi kaasupolttoaineen biokaasuosuus on ALIISA-laskelmissa vain 50 %, kun se on jo nykyisin sitä korkeampi ja nousee TIMES-laskelmissa edelleen, ja lisäksi biokaasun on ALIISA-laskelmissa oletettu sisältyvän vuoden 2030 nykylain mukaiseen jakeluveliteeseen, kun taas TIMES-laskelmissa 30 %:n jakeluvelite koskee vain bensiinin ja dieselin bio-osuutta. Tieliikenteen sähköistyminen on myös TIMES-tuloksissa jonkin verran nopeampaa ja alkaa näkyä huomattavana vuoden 2030 jälkeen myös muussa kuin henkilöautoliikenteessä (esimerkiksi bussit, kaksipyöräiset ja kevyt tavaraliikenne). WEM-skenaariossa sähköhenkilöautojen asemaa parantaa myös erityisesti vuoden 2030 jälkeen uudessa perusennusteessa oletettu polttomootoriautoja huomattavasti suurempi vuotuinen ajokilometrimäärä. Lisäksi WAM-skenaariota osalta on huomattava, että TIMES-malli pakotettiin saavuttamaan 50 %:n päästönvähennys vuonna 2030 sekä fossiilittoman liikenteen tiekartan mukainen lähes nollapäästötaso vuoteen 2045 mennessä, jotka vaikuttavat huomattavasti tieliikenteen kehityksuraan. Lisäksi TIMES-mallissa oli asetettu taakanjakosektorin kokonaispäästöille 2030 hyvin tiukka 50 %:n vähennystavoite, joka väistämättä vaikuttaa integroidussa tarkastelussa myös liikenteeseen. ALIISA-mallin WAM-laskelman tuloksissa puolestaan kotimaanliikenteen päästöt jäävät vuonna 2030 hieman 50 %:n tavoitetta suuremmiksi ja ovat vuonna 2045 yhä noin 3 miljoonaa tonnia, minkä ei voi vielä katsoa vastaavan fossiilittoman liikenteen tavoitteita.

Työkoneiden osalta TYKO-mallin avulla on tehty yksityiskohtaiset laskelmat työkoneiden energiakäytön ja päästöjen kehityksestä perusurassa sekä maltillisessa sähköistymisvaihtoehdossa, ottaen huomioon nykylain mukainen jakeluvelite. TYKO-mallin tulosten ja integroidun tarkastelun päästötulosten keskeisimmät erot ovat seuraavat:

- TYKO-mallin perusskenaariossa työkoneiden kokonaispäästöt ovat 2,1 Mt/a vuosina 2030–2035, ja TYKO-mallin perus-sähköistymisskenaariossa 2,0 Mt vuonna 2030 ja 1,9 Mt vuonna 2035. TIMES-mallin WEM-skenaariossa työkoneiden päästöt ovat 2,1 Mt vuonna 2030 ja vuonna 1,9 Mt vuonna 2035. Sähköistymisen perusskenaariota verrattuna TIMES-tulosten päästötason ero on siis vuonna 2030 noin 0,1 Mt, ja vuonna 2035 ero on 0 Mt.
- TYKO-mallilla ei ole varsinaisesti laskettu WAM-skenaariota, mutta suuremman biojakeluveliteen variantti (20%–34% vuosina 2030–2035), jossa päästöt ovat vuonna 2030 1,8 Mt ja vuonna 2035 1,4 Mt. TIMES-mallin WAM-skenaariossa päästöt ovat 1,4 Mt vuonna 2030 ja 1,0 Mt vuonna 2035.

Kuten yllä olevista luvuista nähdään, integroidussa tarkastelussa työkoneiden WEM-päästöt ovat vuonna 2035 perusskenaariota sähköistymisvariantin mukaiset, mutta sitä ennen ne jäävät hieman suuremmiksi. Ero on vuonna 2030 melkein sama kuin kotimaanliikenteessä (0,2 Mt) mutta päinvastainen, joten vuoden 2030 ero liikenteen ja työkoneiden päästöissä näin ollen melkein kumoavat toisensa.

Integroidun tarkastelun WAM-skenaariossa työkoneiden päästöt kuitenkin alenevat jo selvästi nopeammin kuin TYKO-mallin suuremman jakeluelvoitteen variantissa, mikä johtuu pääosin työkonekannan nopeammasta sähköistymisestä integroidussa WAM-skenaariossa. Vuonna 2040 päästöt ovat TYKO-mallin suuremman biojakeluelvoitteen variantissa 1,3 Mt, mutta mallilla on tehty myös nopeamman sähköistymisen variantti, jossa päästöt alenevat 1,0 Mt:n tasolle vuonna 2040 (Markkanen & Lauhkonen 2021). Integroidussa tarkastelussa puolestaan työkoneiden päästöt ovat WAM-skenaariossa enää 0,8 Mt vuonna 2040, sillä laskentamallissa nämä molemmat keskeiset muutostekijät saavat huomattavan päästöjä vähentävän vaikutuksen.

Maatalouden osalta integroidussa tarkastelussa käytettiin lähtötietoina Luken maatalouden Dremfia-mallia (maatalustuotanto, kotieläinten määrät) sekä soveltuvin osin Luken maatalouden päästölaskentaa. Myös TIMES-mallissa on kuitenkin mallinnettu maatalouden päästöjen muodostuminen kohtalaisen yksityiskohtaisesti, lähtien eläinmääristä ja viljelyalasta sekä sisältäen muun muassa lannankäsittelyn eri vaihtoehtoja, biokaasutuksen laajentamisen ja kotieläinten ruokinnan muutostoimia. Luken mallien ja integroidun tarkastelun päästötulosten keskeisimmät erot ovat seuraavat:

- WEM-skenaariossa maatalouden päästöt ovat Luken laskentamallien mukaan 6,3 Mt vuonna 2030, 6,2 Mt vuonna 2035, ja 6,1 Mt vuonna 2040. Vastaavasti TIMES-mallin tuloksissa 6,3 Mt vuonna 2030, 6,2 Mt vuonna 2035 ja 6,1 Mt vuonna 2040. Päästötasojen erot ovat siten noin 0,0 Mt vuosina 2030–2040.
- WAM-skenaariossa maatalouden päästöt ovat Luken laskentamallien mukaan 5,9 Mt vuonna 2030, 5,8 Mt vuonna 2035, ja 5,6 Mt vuonna 2040. Vastaavasti TIMES-mallissa ne ovat 5,7 Mt vuonna 2030 ja 5,6 Mt vuonna 2035 ja 5,4 Mt vuonna 2040. Päästötasojen erot ovat siten noin 0,2 Mt vuosina 2030–2040.

WEM-skenaariossa päästötasoissa ei siis ole käytännössä eroja maatalouden sektori-analyysin ja integroidun tarkastelun välillä. WAM-skenaariossa päästöt ovat kuitenkin integroidussa tarkastelussa noin 0,2 Mt pienemmät vuosina 2030–2040, mikä johtuu pääosin integroidun mallin lannankäsittelymuutoksista ja biokaasutuksen lisäämisestä tiukkojen taakanjakosektorin päästötavoitteiden saavuttamiseksi.

Kaikkiaan WEM-skenaariossa liikenteen, työkoneiden ja maatalouden sektorikohtaisten laskentamallien ja integroidun tarkastelun päästötasojen erotus on vuonna 2030 yhteensä noin 0,1 Mt ja vuonna 2035 noin 0,6 Mt. Vuoden 2035 ero syntyy lähes kokonaan kotimaanliikenteen nopeammasta päästönvähennyksestä integroidussa tarkastelussa. Rakennusten energiakäytön osalta sektorianalyysi ei tuottanut päästöjen kehitysarvioita, vaan ainoastaan lähtötietoja integroidulle tarkastelulle, joten päästöjen kehitysarvioiden mahdollisia eroja ei voida siltä osin arvioida.

Lähteet

- Afry 2020. Selvitys turpeen energiakäytön kehityksestä Suomessa. Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle 8/2020. Pöyry Management Consulting Oy.
- Bokinge et al. 2020. Nordic P2X for Sustainable Road Transport. Nordic Energy Research. [Nordic-Power-2X-for-Sustainable-Road-Transport.pdf](#)
- DEA 2020. Technology Data for energy carrier generation and conversion – Update July 2020. Danish Energy Agency. [technology_data_for_renewable_fuels.pdf](#)
- EC 2020. Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2021. Draft for consultation in CCC WG2, 25/06/2020.
- FINLEX 2019a. Laki biopolttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä annetun lain muuttamisesta. 419/2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190419>
- FINLEX 2019b. Laki biopolttoöljyn käytön edistämisestä. 418/2019. 29.3.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2019/20190418>
- Forsman, Jimmy, Närhi, Jussi, Uimonen, Heidi, Semkin, Nikita, Miettinen, Ville & Toivola, Sini 2021. Hiilineutraalisuustavoitteen vaikutukset sähköjärjestelmään. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:4
- Hakala, K., Huuskonen, S., Lötjönen, T., Hynynen, J. 2014. Synthesis report on biobased raw material potential and availability. Cleen Oy Research report D 2.1.1.
- Hannula, I. & Kurkela, E. 2013. Liquid transportation fuels via large-scale fluidised-bed gasification of lignocellulosic biomass. Espoo: VTT Technology 91.
- Hannula, I. 2015. Synthetic fuels and light olefins from biomass residues, carbon dioxide and electricity Performance and cost analysis. Espoo: VTT Science107.
- Hannula, I. 2016. Hydrogen enhancement potential of synthetic biofuels manufacture in the European context: A techno-economic assessment. Energy 104 (2016) 199–212.
- Hannula, I. & Melin, K. 2020. Biorefineries with CCS. Report for IEAGHG. September 2020.

Honkatukia, J. 2021. WEM-kansantalousskenaario. Luonnos 10.6.2021.
www.hiisi2035.fi

IEA 2015. Technology Roadmap – Hydrogen and Fuel Cells. International Energy Agency.

Jääskeläinen, S. & Laurikko, J. 2020. Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen perusennuste 2020–2050 (22.4.2020). Helsinki: LVM. MUISTIO_20200422120412.pdf

Kangas, H-L., Vainio, T., Sankelo, P., Vesanen, S. & Karhinen, S. 2020. Suomen korjausrakentamisen strategia 2020–2050 tavoitteiden laskenta ja aineisto. Ympäristöministeriö.

Keith, D. W. & al. 2018. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. Joule (2018), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>

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., Aakkula, J., Honkatukia, J., Soimakallio, S., Haakana, M., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Kärkkäinen, L., Laitila, J., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Maanavilja, L., Ollila, P., Siikavirta, H., Tuomainen T. 2020. Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot. VTT Technology 366. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2020/T366.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., Niskanen, O., Karhula, T. & Jansik, C. 2017. Maatalouden rakennekehitys ja investointitarve vuoteen 2030. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 19/2017.

Lehtonen, H., Saarnio, S., Rantala, J., Luostarinen, S., Maanavilja, L., Heikkinen, J., Soini, K., Aakkula, J., Jallinoja, M., Rasi, S., Niemi, J. 2020. Maatalouden ilmastotiekartta – Tiekartta kasvihuonekaasu-päästöjen vähentämiseen Suomen maataloudessa. Helsinki: Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto MTK ry. 131 s. Saatavissa: <https://www.mtk.fi/ilmastotiekartta> ISBN 978-952-9733-54-5.

- Loulou R. 2008. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part II: Mathematical formula-tion. Computational Management Science, 5(1–2):41–66.
- Loulou R., Labriet M. 2008. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model struc-ture. 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). iea-etsap.org
- Luke 2020. Metsäteollisuus ry:n ilmastotiekartta: Metsien käsittelyskenaariot. Hiilivastaston kasvattaminen. Luonnonvarakeskus Luke. Loppuraportti.
- LVM 2020. Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:18.
- Maanavilja, L., Tuomainen, T., Aakkula, J., Haakana, M., Heikkinen, J., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Koikkalainen, K., Kärkkäinen, L., Lehtonen, H., Miettinen, A., Mutanen, A., Myllykangas, J-P., Ollila, P., Vii-tanen, J., Wall & A. 2021. Hiilineutraali Suomi 2035. Maankäyttö- ja maataloussektorin perusskenaario (WEM). Luonnos 11.6.2021. www.hiisi2035.fi
- Markkanen, J., & Lauhkonen, A. 2021. Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-00245-21
- Marttinen S., Luostarinen S., Winquist E., Timonen K. 2015. Rural biogas: feasibility and role in Finnish energy system. Cleen Oy, Research report no 1.1.3-4.
- Pöyry 2016. Suomen metsäteollisuus 2015–2035. Loppuraportti X304203 19.1.2016. Pöyry Management Consulting.
- Pöyry 2020a. Tiekartta metsäteollisuudelle vähähiilistyvässä yhteiskunnassa, osa: päästöt.
- Pöyry 2020b. Teknoliateollisuuden vähähiilitiekartta 2035. Raportti – vaihe 2. Teknoliateollisuus.
- Sahateollisuus ry 2020. Ilmastoviisas sahateollisuus. Sahateollisuuden hiilitiekartta -raportti. https://sahateollisuus.com/wp-content/uploads/2020/06/st_hiilikartta_raportti.pdf

SVT 2019. Väestöennuste 2019. Suomen virallinen tilasto (SVT): Väestöennuste [verkkojulkaisu]. ISSN 1798-5137. Helsinki: Tilastokeskus.
<https://www.stat.fi/til/vaenn/2019/>

SVT 2021. Kasvihuonekaasupäästöt. Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkojulkaisu]. ISSN 1797-6049. Helsinki: Tilastokeskus.
http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_tie_001_fi.html

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

TEM 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki 2017.

TK 2021. Energia 2020 -taulukkopalvelu. Tilastokeskus, julkaisujen taulukkopalvelut.

UN 2019. World Population Prospects 2019. United Nations, Population Division.

Vainio, T. (2020). Asuntotuotantotarve 2020-2040. VTT Technology 377.

VM 2020. Suomen julkisen talouden kestävyys. Valtiovarainministeriön julkaisuja 2020:59.

YM 2017. Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030. Kohti ilmastoviisasta arkea. Ympäristöministeriön raportteja 21/2017. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80703/YMra_21_2017.pdf

tietokayttoon.fi

ISBN PDF 978-952-383-318-0

ISSN PDF 2342-6799