

LUONNOS

Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot (KEITO) – keskipitkän aikavälin vaikutusarviot

Editorit: Tiina Koljonen (VTT),
Sampo Soimakallio (Syke), Tarja
Silfver (Luke), Mari Kivinen (GTK)



**Euroopan unionin
rahoittama**

NextGenerationEU

Esipuhe

Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot (KEITO) -hanke on toteutettu Euroopan unionin RePower-rahoitusinstrumentin avulla yhteistyössä Syken koordinoiman RePower CEST- (Clean Energy System Transition) ja Luken RePower-hankkeen kanssa. KEITO-työn toteutukseen on osallistunut laaja joukko tutkijoita VTT:ltä, Syke:stä, Luke:sta ja GTK:lta ja KEITO-kokonaisuutta on koordinoinut VTT. Työtä on ohjannut ministeriöiden edustajista koostuva seurantaryhmä, jonka puheenjohtajana on toiminut teollisuusneuvos Petteri Kuuva työ- ja elinkeinoministeriöstä.

KEITO-hankkeessa laaditut laskennalliset ja laadulliset skenaariot ovat tukeneet keskipitkän ja pitkän aikavälin energia- ja ilmastopoliittista päätöksentekoa. Keskipitkän aikavälin skenaariolaskelmien tuloksia on esitelty puhtaan energian, ympäristön ja huoltovarmuuden (PEYH) -ministerityöryhmälle, joka on hyödyntänyt KEITO-laskelmia tausta-aineistona poliittisissa linjauksissaan. KEITO-laskemat eivät kuitenkaan perustu pääministeri Orpon hallituksen linjauksiin uusista energia- ja ilmastotoimista, vaan laskelmiin on sisällytetty joukko mahdollisia toimia, joita on valmisteltu eri ministeriöissä. Pitkän aikavälin skenaariotyöhön on lisäksi sisällytetty laaja sidosryhmäyhteistyö ja kansalaisten näkökulmia on huomioitu laajan kansalaiskyselyn avulla.

Tässä raportissa on esitetty keskipitkän aikavälin skenaarioihin liittyvät laskennalliset ja laadulliset analyysit ja pitkän aikavälin ilmastoskenaarioihin liittyvät analyysit on esitetty toisessa VTT Technology -raportissa.

KEITO-hankkeen tutkijat haluavat kiittää seurantaryhmää työn ohjauksesta sekä kaikkia aktiivisia sidosryhmien edustajia, jotka ovat osallistuneet työpajoihin sekä keskusteluihin Suomen poluista kohti puhdasta energiasiirtymää ja hiilineutraalia Suomea.

Tiina Koljonen, VTT

Helsingissä 1.7.2025

Sisällysluettelo

Esipuhe	4
Sisällysluettelo	5
Symboliluettelo	9
1 Johdanto	11
1.1 KEITO-hankkeen tausta ja tavoite	11
1.2 Kuvaus taustatutkimuksista ja -aineistoista	12
1.3 Tutkimusmenetelmät	12
1.4 SOVA:n toteutus ja tutkimusmenetelmät	12
2 Keskipitkän aikavälin skenaarioiden lähtökohdat ja muodostaminen	15
2.1 Perusskenaarion (WEM) kuvaus ja keskeiset lähtötiedot	15
2.2 Poliittikkaskenaarion (WAM) kuvaus ja keskeiset lähtötiedot	18
2.3 Päästökauppasektoriin liittyvät lähtöoletukset	19
2.3.1 Energiantensiivisen teollisuuden kehitys	19
2.3.2 Kaivannaisteollisuuden kehitys	21
2.3.3 Hiilidioksidin talteenotto ja tekniset hiilinielut	24
2.3.4 Energian ja polttoaineiden tuotanto	25
2.4 Taakanjakosektorin kehitykset	27
2.4.1 Tieliikenteen kehitys	27
2.4.2 Vesiliikenne	31
2.4.3 Rautatieliikenne	32
2.4.4 Lentoliikenne	32
2.4.5 Työkonesektorin kehitys	33
2.4.6 Rakennuskannan ja rakentamisen kehitys	35
2.4.7 Maatalouden kehitys	40
2.4.8 Jätesektorin kehitys	44
2.4.9 F-kaasujen kehitys	45

2.4.10	Muu taakanjakosektori	47
2.5	Maankäyttösektori ja sen muutokset	48
2.5.1	Maankäytön kehittyminen	50
2.5.2	Metsäsektorin kehitys.....	52
3	Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasupäästöjen kehitys	61
3.1	Energian hankinta.....	61
3.2	Energian kulutus.....	66
3.2.1	Loppuenergian kokonaiskulutus.....	66
3.2.2	Sähköenergian kulutus.....	69
3.2.3	Asuminen ja palvelut.....	70
3.2.4	Kotimaanliikenteen energia	71
3.2.5	Teollisuuden loppuenergia	73
3.2.6	Muu energiankulutus.....	74
3.3	Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys.....	76
3.3.1	Päästöjen kokonaistaseen kehitys	76
3.3.2	Taakanjakosektorin päästöjen kehitys	79
4	Maankäyttösektorin päästöjen ja poistuminen kehitykset.....	83
5	Kokonaisarvio keskipitkän aikavälin energia- ja ilmastotavoitteiden toteutumisesta nykyisin ja lisäksi toimin	87
6	Kansantalouden kehitys	90
6.1	WEM-skenaario	91
6.2	WAM-skenaario	96
6.3	Puhtaan energiasiirtymän aluetalousvaikutustarkastelut	103
6.3.1	Investointien ja tuotantotoimintojen alueellinen sijoittuminen	104
6.3.2	Aluetalouden WEM-skenaario.....	106
6.3.3	Tulokset	107
7	Ilmasto- ja energiapolitiikan ympäristövaikutukset (SOVA)	111
7.1	Päästövaikutukset Suomen rajojen ulkopuolella.....	113
7.2	Kulutuksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt.....	118
7.3	Hiilinielut ja metsien käyttö	120
7.4	Sosiaaliset vaikutukset	120
7.5	Energiaturvallisuus ja huoltovarmuus	123
7.6	Ilmanlaatu ja terveys.....	124
7.6.1	Ilmansaasteiden kansanterveydelliset vaikutukset Suomessa	125
7.6.2	Puulämmityksen ja katupölyn päästöihin ja ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä tulevaisuudessa	128

7.7	Luonnonvarojen käyttö	130
7.7.1	Kansantalouden materiaalivirrat.....	130
7.7.2	Vähäpäästöisten teknologioiden materiaaliarve ja tuotannon ympäristö- ja sosiaaliset vaikutukset.....	132
7.7.3	Kaivosteollisuuden sääntely Suomessa	136
7.7.4	Resurssitehokkuus ja kiertotalous.....	137
7.8	Luonnon monimuotoisuus	140
7.8.1	Metsät	143
7.8.2	Maatalous	145
7.9	Maaperä, pohjavesi ja vesistöt	146
7.9.1	Maaperä ja pohjavesi	146
7.9.2	Vesistöt	150
7.10	Yhdyskuntarakenne ja rakennettu ympäristö	152
7.11	Keskeisten energiateknologioiden vaikutuksia.....	154
7.11.1	Pienydinvoima.....	155
7.11.2	Tekniset hiilinielut.....	157
7.11.3	Hiilidioksidin varastoinnin teknologiat.....	158
7.11.4	Vety.....	159
7.11.5	Tuulivoima.....	160
7.11.6	Aurinkovoima	169
7.11.7	Geoenergia	171
7.11.8	Liikenteen sähköistyminen	172
7.12	WAM-toimien vaikutukset	178
8	Johtopäätökset	180
8.1	Keskipitkän aikavälin energia- ja ilmastotavoitteiden saavuttaminen....	180
8.2	Ympäristöön, talouteen ja ihmisiin kohdistuvat vaikutukset	181
8.3	Keskeiset epävarmuudet ja niihin vastaaminen.....	182
	Kiitokset.....	185
	Lähdeluettelo	186
	Liite A. KEITO-tutkimuksessa käytetyt sektori-, energiajärjestelmä- ja talousmallit.....	224
	Liite B. WEM- ja WAM-skenaarioiden määrittelyt.....	237
	Liite C. Puusto- ja maaperälaskennan uudistukset maankäyttösektorin skenaarioissa	243
	Liite D. Maankäytön muutokset	248
	Liite E. Metsävaraskenaarioiden tulokset koko Suomessa.....	251

Liite F. Tärkeimpien ilmansaasteiden sektorikohtaiset päästöt KEITO-hankkeen WEM-skenaariossa.....	255
Liite G. Kasvihuonekaasujen päästöt luokittain WEM- ja WAM-skenaariossa	256

Symboliluettelo

3-NOP	3-nitro-oksipropanoli on rehulisäaine, joka vähentää nautojen pötsikäymisessä syntyvää metaania estämällä metaanintuotannossa keskeisen entsyymin toimintaa
BECCS	Bioenergy Carbon Capture and Storage, biogeenisen hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CO ₂	Hiilidioksidi
CO ₂ -ekv.	Hiilidioksidiekvivalentti, joka sisältää hiilidioksidin lisäksi muiden kasvihuonekaasupäästöt, joiden ilmastovaikutus on muunnettu vastaamaan hiilidioksidin ilmastovaikutusta eli globaalia lämmityspotentiaalia sadan vuoden tarkastelujaksolla
GTK	Geologian tutkimuskeskus
DACCS	Direct Air Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä ja varastointi
EED	Energy Efficiency Directive, EU:n energiatehokkuusdirektiivi
EPBD	Energy Performance Buildings Directive, EU:n asettama rakennusten energiatehokkuusdirektiivi
ETS1	EU:n päästökauppa, joka sisältää yli 20 MW suuriset energiantuotantolaitokset, energiantensiivisen teollisuuden (esim. jalostamot, teräs-, sementti-, metsä- sekä osan muusta kemianteollisuudesta) sekä EU-alueen sisäinen kaupallinen lentotoiminta ja meriliikenne.
ETS2	Erillinen päästökauppajärjestelmä vuodesta 2027, joka kattaa liikenteen, rakennusten erillislämmityksen, työkoneiden ja maatalouden kasvihuonekaasupäästöt.
KAISU	Keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelma
KHK	Kasvihuonekaasu
Luke	Luonnonvarakeskus

PM	Pääministeri
SOVA	Suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutukset
STIC	Standard International Trade Classification, Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) julkaisema kansainvälisen kaupan luokittelu
Syke	Suomen ympäristökeskus
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
WAM	With Additional Measures eli lisätoimiskenaario
WEM	With Existing Measures eli nykytoimiskenaario
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

1 Johdanto

Tiina Koljonen, VTT & Sampo Soimakallio, Syke

1.1 KEITO-hankkeen tausta ja tavoite

Pääministeri Orpon hallitusohjelman (Valtioneuvosto 2023a) mukaan Suomi sitoutuu ilmastolain tavoitteisiin ja etenemään hiilineutraalisuustavoitteeseen. Hallituksen tavoitteena on edistää Suomen asemaa edelläkävijänä valmistelemalla hiilinegatiivisuutta tavoittelevan uuden energia- ja ilmastostrategian, jonka keskeisenä osana on teollisuuden puhtaan siirtymän ja investointien edistäminen. Lisäksi hallitusohjelman mukaan taakanjakosektorin päästövelka minimoidaan ja päästötavoitteisiin vastataan vuoden 2030 vuosipäästöjen tasoa koskien päivittämällä keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelma. Toisaalta hallitus tarkistaa hiilineutraalisuusstrategiaa uuden energia- ja ilmastostrategian valmistelun yhteydessä.

Kansallinen ilmastolaki (Finlex 2022) määrittää, että valtioneuvosto hyväksyy vähintään kerran kymmenessä vuodessa pitkän aikavälin ilmastosuunnitelman, jossa on esitetty taakanjako-, päästökauppa- ja maankäyttösektorin yhteenlaskettujen kasvihuonekaasujen päästöjen ja poistumien kehitystä koskevat skenaariot, jotka kattavat vähintään seuraavat 30 vuotta. Ilmastolain mukaan pitkän aikavälin ilmastosuunnitelma on annettava viimeistään vuonna 2025.

KEITO-hankkeen tavoitteena on ollut laatia taustaselvitykset, joita voidaan hyödyntää uuden energia- ja ilmastostrategian, keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelman (I. KAISU:n) sekä pitkän aikavälin ilmastosuunnitelman laadinnassa. KEITO-hankkeen kokonaiskesto oli reilun vuoden alkaen keväällä 2024 ja päättyen kesään 2025. Hankkeen alkupuoli painottui keskipitkän aikavälin laskelmien ja analyysien laadintaan, jonka jälkeen työssä keskityttiin pitkän aikavälin ilmastosuunnitelmaan liittyvään osuuteen. Analyysien painopiste on ollut laskennallisissa skenaarioarvioissa. Lisäksi työssä on lähinnä laadullisesti arvioitu vaikutuksia ympäristöön (I. SOVA), laadittu synteesi valikoitujen toimialojen vähähiilisyystiekartoista sekä kartoitettu kansalaisten asenteita, motivaatioita ja valmiuksia puhtaan energian siirtymään ja ilmastotoimiin laajan kansalaiskyselyn avulla. Tässä raportissa on esitetty keskipitkän aikavälin skenaario- ja SOVA-arvioinnin tulokset. Pitkän aikavälin skenaariot, tiekarttasynteesi ja

kansalaiskyselyn tulokset on esitetty myöhemmin julkaistavassa toisessa VTT Technology -sarjan raportissa (Koljonen ym. 2025).

1.2 Kuvaus taustatutkimuksista ja -aineistoista

KEITO-hankkeen keskeisin tausta-aineisto on kesällä 2024 julkaistu VN TEAS PEIKKO (Perusskenaariot energia- ja ilmastotoimien kokonaisuudelle kohti päästöttömyyttä) -hankkeessa laaditut perusurat, eli perusskenaariot (Koljonen ym. 2024).

Pääministeri Sanna Marinin hallituksen aikana laadittiin myös synteesi toimialojen vähähiilisyystiekartoista VN TEAS HIISI (Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset) -hankkeen puitteissa (Koljonen ym. 2021). Lisäksi kansalaisten näkemyksiä ilmastomuutoksen hillintään selvitettiin edellisen pitkän aikavälin kokonaispäästökehitystä arvioineen hankkeen (VN TEAS PITKO) puitteissa (Koljonen ym. 2019) kansalaiskyselyn avulla. KEITO-hankkeen käytössä oli siten varsin laaja-alainen tausta-aineisto, jonka avulla voitiin myös laatia vertailuja eri näkökulmiin liittyen.

1.3 Tutkimusmenetelmät

KEITO-hankkeen pääpaino oli laskennallisissa analyyseissä, joita laadittiin sekä keskipitkän että pitkän aikavälin osakokonaisuuksille. Laskennallisissa analyyseissä on käytetty useita sektorimalleja sekä integroituja energiajärjestelmä- ja talousmalleja, joiden kuvaukset on esitetty liitteessä (Liite A). Mallinnusmenetelmät ovat olleet lähtökohtaisesti samat kuin PEIKKO-hankkeessa (Koljonen ym. 2024), mutta mallien tietokantoja on päivitetty uusimpien tilasto- ja muiden lähtötietojen osalta siten, että lähtöoletukset vastaavat paremmin nykytietoa.

Laskennalliset analyysit ovat myös tuottaneet aineistoja laadullisiin arviointeihin, kuten SOVA:an. Lisäksi laskennallisia skenaariotuloksia on verrattu kansalaiskyselyn tuloksiin sekä toimialojen vähähiilitiekarttoihin, jotka antavat viitteitä mahdollisista haasteista tai mahdollisuuksista puhtaaseen siirtymään sekä yksityisten kuluttajien että yritysten näkökulmista. Kansalaiskyselyn tulokset ja toimialojen tiekarttasynteesi on esitetty pitkän aikavälin skenaarioiden yhteydessä myöhemmin julkaistavassa erillisessä raportissa (Koljonen ym. 2025).

1.4 SOVA:n toteutus ja tutkimusmenetelmät

Energia- ja ilmastostrategia ja KAISU kuuluvat viranomaisten suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutusten arvioinnista annetun lain (200/2005) eli SOVA-lain soveltamisalaan. Viranomaisten suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutusten arvioinnista annettu laki eli SOVA-laki (200/2005) tavoittelee ympäristövaikutusten arvioinnin ja huomioon ottamisen edistämistä viranomaisten laatimien

suunnitelmien ja ohjelmien valmistelussa ja hyväksymisessä, yleisön tiedonsaannin ja osallistumismahdollisuuksien parantamista sekä kestävä kehityksen edistämistä. Lain mukaan viranomaisen tulee selvittää ja arvioida valmistelemiensa suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutukset (SOVA) riittävässä määrin valmistelun kuluessa (§3), jos niiden toteuttamisesta voi aiheutua merkittäviä vaikutuksia esimerkiksi ihmiseen, luontoon ja sen monimuotoisuuteen, rakennettuun ympäristöön, maisemaan tai luonnonvaroihin Suomessa tai sen alueen ulkopuolella (§2).

SOVA-laissa listattuja ympäristövaikutuksia ovat a) ihmisten terveyteen, elinoloihin ja viihtyvyyteen; b) maaperään, vesiin, ilmaan, ilmastoon, kasvillisuuteen, eliöihin ja luonnon monimuotoisuuteen; c) yhdyskuntarakenteeseen, rakennettuun ympäristöön, maisemaan, kaupunkikuvaan ja kulttuuriperintöön; d) luonnonvarojen hyödyntämiseen; ja e) edellä mainittujen tekijöiden keskinäisiin vuorovaikutussuhteisiin liittyvät vaikutukset.

SOVA-lain tarkoittamat eri toimien ympäristöön ja yhteiskuntaan kohdistuvat vaikutukset voivat olla myönteisiä, neutraaleja tai kielteisiä. Hyödylliset vaikutukset edistävät muissa yhteyksissä asetettuja yhteiskunnallisia tavoitteita. Muiden kuin ilmastoon liittyvien velvoitteiden tai tavoitteiden saavuttamista vaikeuttavat asiat ovat puolestaan kielteisiä vaikutuksia. Tässä KEITO-hankkeessa toteutetussa SOVA-arvioinnissa tarkastellaan ensisijaisesti mahdollisia kielteisiä ja myönteisiä vaikutuksia, koska ne voivat johtaa jatkotoimien tarpeeseen.

SOVA-lain mukaisia keskeisiä potentiaalisia vaikutuksia ympäristöön ja yhteiskuntaan tarkastellaan raportin luvussa 7. Ilmastonmuutoksen hillinnän ja energiamurroksen laaja-alaisuuden ja yhteiskunnallisen läpileikkaavuuden sekä SOVA-lain laajan tulkinnan vuoksi kaikkia mahdollisia vaikutuksia ei pystytä ennakoimaan, joten merkittävä osa tarkastelusta on laadullista ja suuntaa antavaa. SOVA-arvioinnissa pyrittiin kuvaamaan kehitystä toisaalta keskeisten ympäristövaikutusluokkien ja toisaalta keskeisten teknologioiden osalta sekä perus- että politiikkaskenaariossa.

Aineistona eri toimien ja toimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa on hyödynnetty tieteellisiä vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita ja muita selvityksiä, eri toimialojen laatimia vähähiilisyys- ja ilmastotiekarttoja (yhteenvedot Paloneva & Takamäki 2020; Silver & Tuokko 2024) sekä HIISI-hankkeen SOVA-arvioinnissa (Soimakallio ym. 2021) aiemmin kartoitettuja eri teknologioiden ja muiden toimien potentiaalisia vaikutuksia. Kirjallisuuden lisäksi vaikutusten arvioinnissa on hyödynnetty Suomen kansantalouden ympäristölaajennettua panos-tuotosmallia (Seppälä ym. 2011, Salo ym. 2023) Suomen kansantalouden käyttämien materiaaliavirtojen ympäristö- ja talousvaikutusten ja kulutusperäisten päästöjen mallintamisessa sekä terveysvaikutusten mallintamisessa ilmansaasteiden päästöjen ja niiden vaikutusten alueellista päästöskenaariomallia (Finnish Regional Emission Scenario model, FRES, Karvosenoja 2008, Savolahti ym. 2019).

Arvioinnissa ei ole huomioitu teknologioiden ja muiden ratkaisujen käyttöönottoon tarvittavien toimien tai toimenpiteiden välillisiä vaikutuksia. Tällaisia

voivat olla esimerkiksi toimen myötä kertymättä jääneet verovarot tai käyttämättömät tukivarat ja niiden vaikutukset suhteessa tilanteeseen, jossa toimea ei ole toteutettu. Yksittäiset päästöjä vähentävät teknologiat ja muut ratkaisut vaikuttavat toimenpidetasolla myös toisiinsa, mistä aiheutuu erilaisia ja eritasoisia ristikkäisvaikutuksia, jotka voivat joko vahvistaa tai heikentää vaikutuksia. Yksittäisten teknologioiden tai muiden ratkaisujen kohdalla ole huomioitu myöskään tällaisia vaikutuksia, mutta ne tulevat osin huomioiduksi kokonaistarkasteluissa. Arvioinnissa on pyritty tunnistamaan myös ympäristövaikutuksiin liittyviä keskeisiä haasteita tai riskejä, jotka voivat osaltaan heikentää päästöjä vähentävän teknologian tai muun ratkaisun käyttöönottoa.

Politiikkatoimien myöhemmin tarkentuessa ja toteutuessa erilaisten teknologioiden ja toimenpiteiden kautta muodostuu usein paikallisesti tai alueellisesti merkittäviä suoria tai välillisiä vaikutuksia. Toteutettavat toimet on merkittävyytensä perustuen mahdollisesti arvioitava tapauskohtaisesti vielä ennen niiden toteutusta esimerkiksi ympäristövaikutusten arviointimenettelyn (YVA)- tai muiden lupamenettelyjen kautta.

2 Keskipitkän aikavälin skenaarioiden lähtökohdat ja muodostaminen

Tiina Koljonen, Elina Aittoniemi, Göran Koreneff, Arttu Lauhkonen, Antti Lehtilä, Terttu Vainio & Lassi Similä, VTT
Tarja Silfver, Jyrki Aakkula, Hannu Hirvelä, Markus Haakana, Heikki Lehtonen, Juha Mikola, Antti Mutanen, Jari Viitanen & Sofia Vikfors, Luke
Tommi Forsberg & Olli Koskivaara, Syke
Mari Kivinen & Jonna Tirroniemi (GTK)

2.1 Perusskenaarion (WEM) kuvaus ja keskeiset lähtötiedot

Aiemmassa PEIKKO-hankkeessa (Koljonen ym. 2024) laadittiin kolme vaihtoehtoista perusuraa eli WEM (With Existing Measures) -skenaariota, joiden avulla pyrittiin kuvaamaan kehityspolkuja ja niihin liittyviä epävarmuuksia erilaisissa toimintaympäristöissä. Vaihtoehtoiset perusurat, eli referenssiskenaariot nimettiin WEM-Perus (WEM-P), WEM-High (WEM-H) ja WEM-Low (WEM-L) -skenaarioiksi. Keskeiset erot skenaarioiden välillä liittyivät oletuksiin talouden kehityksestä, teollisuuden investointien toteutumisesta sekä teollisuuden ja maatalouden tuotannon ja liikenteen kysyntöjen kehityksistä. Vaihtoehtoisissa WEM-skenaarioissa päädyttiin siten erilaisiin kehityskulkuihin liittyen energian kysynnän ja luonnonvarojen käytön kehityksiin, joilla puolestaan on vaikutus kasvihuonekaasu (KHK) -päästöjen ja -poistumien kehityksiin.

KEITO-hankkeessa perusskenaarioksi valittiin PEIKKO-hankkeen WEM-P-variantti, jota kuitenkin päivitettiin tuoreimman tilastoaineiston mukaan. Tästä poiketen väestöennustetta ei päivitetty Tilastokeskuksen 24.10.2024 julkaistun väestöennusteen mukaiseksi (Tilastokeskus 2024), vaan laskennallisten analyysien taustalla oli aiempi väestöennuste (Tilastokeskus 2021), jota käytettiin PEIKKO-hankkeen analyyseissä. Uuden väestöennusteen mukaan Suomen väkiluku nousisi vajaaseen 6,2 miljoonaan 2050 olettaen nettomaahanmuuton pysyvän nykyisellä tasolla, kun aiemmassa ennusteessa vastaava väkiluku oli reilu 5,5 miljoonaa henkilöä. Ero ennusteiden välillä oli niin merkittävä, että se olisi vaatinut merkittäviä muutoksia perusuran mallintamiseen, johon ei ollut tämän hankkeen puitteissa mahdollisuuksia. Tilastopäivitysten lisäksi joitain investointioletuksia päivitettiin perustuen julkisiin lähteisiin. Esimerkiksi tuuli- ja

aurinkoenergian, sähkökattiloiden ja datakeskusten investoinnit ovat edenneet nopeasti ja huolimatta KEITO-hankkeen aikana tehdyistä päivityksistä, investoinnit ovat saattaneet edetä oletettua nopeammin, joten tältä osin tuloksiin liittyy merkittävää epävarmuutta.

PEIKKO-hankkeessa määritettiin, että politiikkatoimien osalta 31.3.2023 mennessä päätetyt toimet huomioidaan WEM-skenaarion määrittelyssä ja tämän jälkeiset toimet politiikka-, eli WAM (With Additional Measures) -skenaarion määrittelyssä. EU-tason politiikan osalta huomioitiin kuitenkin myös 31.3.2023 jälkeen tehtyjä päätöksiä, eli pääsääntöisesti EU:n energia- ja ilmastopolitiikat joitain poikkeuksia lukuun ottamatta on sisällytetty WEM-määrittelyihin (ks. Liite B). Esimerkkinä mainittakoon päästökaupan laajennus taakanjakosektorille (l. ETS2), joka on huomioitu WEM-skenaariossa.

WEM-skenaarioon sisällytetyt politiikkatoimet on kuvattu tarkemmin PEIKKO-hankkeen raportissa (Koljonen ym. 2024). Lähtökohtaisesti WEM-skenaarioon sisällytetyt ohjaustoimet noudattavat Sanna Marinin hallituskautena laadittuun energia- ja ilmastostrategiaan sekä KAISU:un sisällytettyjä toimia siltä osin, kun ne saatiin lainvoimaiseksi ennen 31.3.2023. WEM-määrittelyiden keskeinen lähtöoletus liittyy myös siihen, kuinka koko EU-alueen ja toisaalta Suomen ilmastotavoitteiden saavuttaminen on määritetty. PEIKKO WEM-laskelmissa on huomioitu EU:n FitFor55-ilmasto ja -energiapaketin mukaiset tavoitteet ja päätökset. Mallinnuksessa ei kuitenkaan huomioitu esimerkiksi EU:n päätöstä siirtää ne energialaitokset taakanjakosektorille, joiden päästöistä yli 95 prosenttia on peräisin kestävästä biomassan poltosta. PEIKKO-hankkeen laskelmien perusteella voitiin todeta, että fossiilisten polttoaineiden käyttö energiantuotannossa kutistuu lähes olemattomaksi (pois lukien yhdyskuntajäte) eikä toisaalta energialaajennusmallinnuksessa ole erikseen tarkastelut kaikkia biokattiloita, joten EU-päätöksen huomioiminen olisi ollut jo mallinnusteknisesti haastavaa.

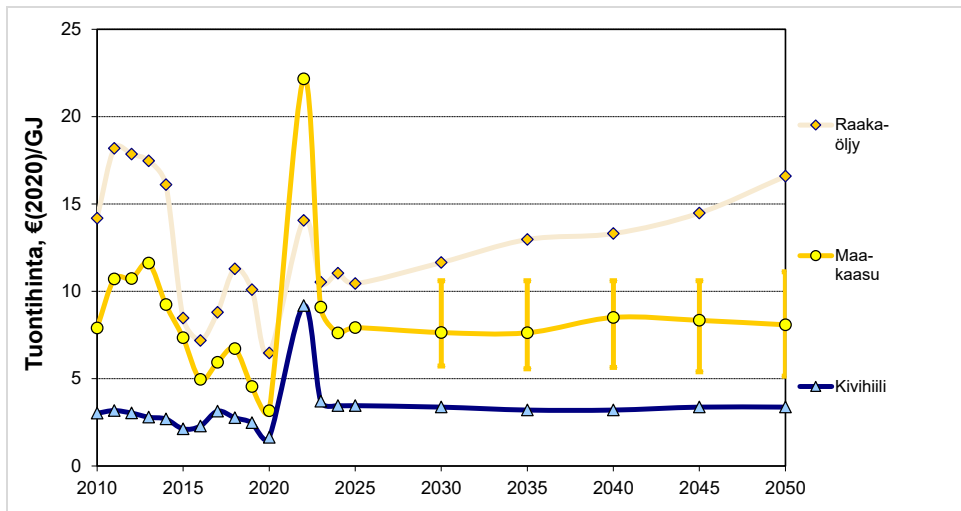
WEM-laskelmissa oletetaan, että EU saavuttaa vuodelle 2030 ja 2050 asetetut päästötavoitteet. Suomen osalta WEM-laskelmissa tarkastellaan, kuinka kaukana tai lähellä ilmasto- ja energiapoliittisten tavoitteiden saavuttaminen olisi nykyisillä toimilla WEM-määrittelyiden mukaisesti, kun huomioidaan sekä kansalliset että EU:n Suomelle asettamat ilmasto- ja energiatavoitteet. Alla on esitetty yhteenveto keskeisistä lähtöoletuksista liittyen talouden sekä ilmasto- ja energiapoliitiikan kehityksiin:

- EU:n ilmasto- ja energiapoliittika: FitFor55-paketin mukainen KHK-päästötavoite -55 % vuodelle 2030 vuoden 1990 päästötasoon verrattuna ja nettonollatavoite vuodelle 2050. Päästökauppadirektiivin (EU 2023/959) mukaiset muutokset on huomioitu, mukaan lukien päästökaupan laajennus taakanjakosektorille (ns. ETS2-sektori). ETS2-hinnoittelu otetaan siten käyttöön vuodesta 2027 lähtien ilman lykkäystä ja laajana. Maataloussektorin osalta on kuitenkin oletettu, että valtio kompensoi maataloussektorille kohdistuvat kustannukset, joten maatalouden KHK-päästöille ei ole mallinnuksissa kohdistettu ETS2-

hintavaikutuksia. ETS2-hintavaikutus kohdistuu siten skenaariolaskelmissa liikenteeseen, työkoneisiin, rakennusten erillislämmitykseen sekä ETS1:n ulkopuoliseen teollisuuteen ja energiantuotantoon.

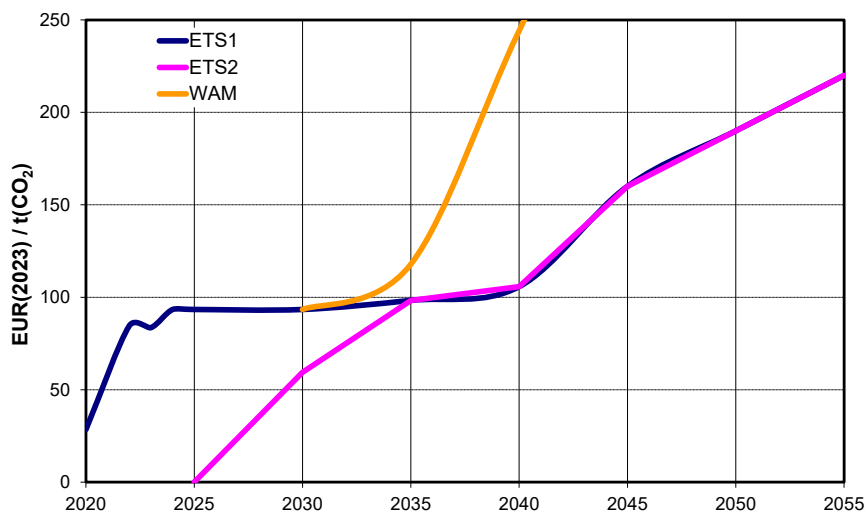
- Kansallinen energia- ja ilmastopolitiikka: 31.3.2023 mennessä toimeenpannut tai päätetyt toimet. Tarkempi lista WEM-toimista on esitetty liitteessä (Liite B).

Fossiilisten tuontipolttoaineiden ja päästöoikeuksien hintaoletuksen osalta on noudatettu EU:n hallintomallin mukaista ohjeistusta WEM- ja WAM-skenaarioiden energiajärjestelmämallinnukseen (EC 2024). Kuvat 1 ja 2 esittävät mallinnuksissa käytetyt hintakehitysten oletukset. Tässä tulee huomata, että venäläisten energiahyödykkeiden tuontikieltojen on oletettu jatkuvan yli koko laskentahorisontin mukaan lukien sekä fossiiliset polttoaineet että bioenergian raaka-aineet. EU:n esittämät ETS1-hinnat WEM:in osalta kehittyvät hyvin maltillisesti vuoteen 2040 asti. ETS2:n osalta komissio on esittänyt ohjehinnat vuosille 2027 30 €/t CO₂, 2028 50 €/t CO₂, 2029 55 €/t CO₂, 2030 60 €/t CO₂ ja tämän jälkeen ETS2-hinnat noudattavat ETS1-hintauraa. EU:n esittämä ETS1-hintaura WAM:ssa nousee jyrkästi vuoden 2030 jälkeen ja nousee 2040 290 €/t CO₂ ja 2050 490 €/t CO₂ hintoihin (vrt. kuva 2). Komission suositusten mukaan (EC 2024) jäsenmaat eivät ole velvolliset käyttämään päästöoikeuksien hinnan WAM-skenaariota, vaan voivat myös omissa WAM-skenaarioissaan käyttää muuta päästöoikeuden



Kuva 1. Fossiilisten tuontipolttoaineiden hintaoletukset EU:n komission suositusten mukaan (lähde: EC 2024). Maa-kaasun osalta mukana on arvioitu epävarmuusväli.

hintakehitystä. Niinpä mallinnuksessa päädyttiin käyttämään samoja hintakehitysarvioita sekä WEM- että WAM-skenaariossa (kuvan ETS1 ja ETS2-hinnat), jotta nähdään uusien WAM-politiikkatoimien vaikutukset mallinnettaviin päästö- ja muihin kehityksiin. Mikäli KEITO-WAM-skenaariossa olisi päädytty käyttämään komission WAM-hintoja päästöoikeuksien kehityksille sen ohjausvaikutus olisi todennäköisesti ollut merkittävämpi kuin kotimaisten uusien ohjaustoimien, jolloin tulosten tulkinta olisi ollut hyvin haastavaa ilman lisälaskelmia esimerkiksi herkkyystarkasteluiden muodossa, johon ei ollut tämän hankkeen puitteissa mahdollisuuksia.



Kuva 2. Päästöoikeuden hintakehitykset WEM ja WAM-skenaariossa (ETS1 & ETS2). Hintakehitys on EU:n WEM-hintaus suosituksen mukainen, vertailukohtana kuvassa on myös vastaava EU:n esittämä WAM-hintaura (EC 2024).

2.2 Poliittikkaskenaarion (WAM) kuvaus ja keskeiset lähtötiedot

Politiikka- eli WAM-skenaarioon on sisällytetty uusia, 31.3.2023 jälkeen päätettyjä energia- ja ilmastopoliittisia ohjaustoimia, joista on joko jo olemassa päätökset tai jotka voisivat olla mahdollisia uusia ohjaustoimia. WAM-skenaarion politiikkatoimien kuvaus ei kuitenkaan vastaa kaikilta osin PM Orpon hallituksen linjaamia uusia poliittisia ohjaustoimia, jotka on sisällytetty hallitusohjelmaan ja/tai ehdotettuun uuteen energia- ja ilmastostrategiaan ja KAISU:un. Liitteeseen B on listattu mallinnetut ohjaustoimet ja alla on esitetty lyhyt yhteenveto:

- PM Orpon hallituskaudella tehdyt päätökset, jotka ovat jo toimeenpantu, kuten jakeluvelvoitteen maltillistuminen, muutokset valmisteveroihin, tietyt tuet tai rahoitus, joista joko on luovuttu kokonaan tai tasoa laskettu PM Orpon hallituksen toimesta.

- EU:n ohjaus, josta on olemassa päätökset (t. hyvin selvät linjaukset), joita ei ole huomioitu WEM:ssä.
- Muut uudet energia- ja ilmastopoliittiset ohjaustoimet perustuen eri ministeriöiden laatimiin ehdotuksiin, joista on tarkempi kuvaus liitteessä B.

2.3 Päästökauppasektoriin liittyvät lähtöoletukset

2.3.1 Energiaintensiivisen teollisuuden kehitys

Energiaintensiivisen teollisuuden kehitys WEM-skenaariossa seuraa pääosin PEIKKO-hankkeen WEM-P-skenaariota (Koljonen ym. 2024). Metsä-, teräs-, ja sementtiteollisuuden osalta tuotanto-oletukset ovat samat kuin WEM-P-skenaariossa, mutta öljynjalostus noudattaa PEIKKO-hankkeen WEM-L-skenaariota mukaista, hieman hitaampaa fossiilisen öljyn jalostuksen supistumista. Muun teollisuuden osalta tuotanto-oletukset noudattavat WEM-P-oletuksia. Alla on lyhyesti kuvattu oletuksia liittyen metallien ja öljynjalostukseen KEITO-skenaariossa. Metsäteollisuuden kehitystä on kuvattu luvussa 2.5.

Suurimmat kasvihuonekaasupäästöjä tuottavat pistelähteet Suomessa ovat masuuniteräksen valmistus ja fossiilisen öljyn jalostus. Samoin kuin PEIKKO WEM-P:ssä myös KEITO-hankkeen WEM- ja WAM-skenaarioissa oletetaan, että metallien jalostuksessa irtaudutaan fossiilisten polttoaineiden käytöstä vuoteen 2040 mennessä mutta öljynjalostuksessa irtautuminen on hitaampaa ja toteutuu valtaosin 2050 mennessä. Investointien toteutumiseen liittyy merkittävää epävarmuutta, joka tulee huomioida tulosten tulkinnassa.

Skenaariomallinnusten lähtökohtana oli, että SSAB investoi Suomessa fossiilittomaan teräksentuotantoon korvaamalla masuunit asteittain valokaariuuneilla ja tuomalla niihin Ruotsissa valmistettuja rautapellettejä. PEIKKO-hankkeen aikana SSAB julkaisi 2.4.2024 tiedotteen¹, että Raahan tehtaan investoinnin osalta edetään vasta, kun Ruotsin Luulajan-projektista on saatu riittävästi kokemuksia. SSAB:n suunnitelmien mukaan Luulajan tehdas olisi käynnissä täydellä kapasiteetilla 2029, joten WEM- ja WAM-skenaarioissa oletettiin, että masuunit korvataan valokaariuunilla vuosina 2035–2040. Sen sijaan Blastr Green Steelin suunnitelma Inkooseen sijoittuvasta terästehtaasta sisälly WEM- eikä WAM-skenaarioihin. Inkoon terästehtaan investointi on kuitenkin sisällytetty pitkän aikavälin skenaariotarkasteluihin samoin kuin julkisuudessa esille tuotu alumiinitehdasinvestointi². Pitkän aikavälin skenaariotarkastelut raportoidaan tulevassa KEITO-hankkeen raportissa.

¹ SSAB (2024). Pörssitiedotteet 2.4.2024. SSAB continues the transformation with a fossil-free mini-mill in Luleå, Sweden. Saatavilla: <https://www.ssab.com/fi-fi/uutiset/2024/04/ssab-continues-the-transformation-with-a-fossilfree-minimill-in-lule-sweden>

² HS (2025). Helsingin sanomat. 12.5.2025. Vihreä sähkösyöppö. <https://www.hs.fi/talous/art-2000011172292.html>

Vuodesta 2025 alkaen Outokumpu Oyj:n oletetaan ryhtyvän korvaamaan koksien käyttöä biohiilellä Tornion ferrokromisulatoissa, jolloin tehdas käyttäisi 25 000 tonnia biohiiltä koksien osittaiseen korvaamiseen vuodesta 2025 alkaen³. Skenaariomallinnuksessa biohiilen tuotantoon investoitiin kotimaassa ja lisäksi biohiilen tuonti oli mahdollista. Bioenergia ry on listannut toteutuneet ja suunnitteilla olevat biohiilihankkeet Suomessa⁴, mutta näiden yhteenlaskettukin kapasiteetti riittäisi noin puoleen ferrokromitehtaan kysynnästä. Mallinnuksessa kuitenkin oletettiin, että noin puolet biohiilen kokonaiskysynnästä Suomessa katettaisiin kotimaisella tuotannolla kotimaisista raaka-aineista ja noin puolet kysynnästä katettaisiin biohiilen tuonnilla. Biohiilen kysyntään ja tarjontaan tulevaisuudessa liittyy kuitenkin merkittävää epävarmuutta, joka tulee huomioida tulosten tulkinnassa.

Kemianteollisuuden osalta Neste Oyj:n Kilpilahden jalostamo on suurin kasvihuonekaasujen päästölähde, mutta Neste on ilmoittanut siirtyvänsä fossiilisen öljyn jalostuksesta asteittain uusiutuvien ja kiertotalousratkaisujen jalostamoksi. PEIKKO WEM-P-skenaariossa oletuksena oli, että tuleva tuotantokapasiteetti olisi noin 3 miljoonaa tonnia uusiutuvia ja kiertotaloustuotteita, kuten uusiutuvaa dieseliä, uusiutuvaa lentopolttoainetta sekä uusiutuvia että kierrätettyjä syöttöaineita polymeeri- ja kemian teollisuudelle⁵. Vaikka Neste on saanut komissiolta tukea ensimmäiseen 120 MW elektrolyyseri-investointiin, Neste päätti luopuvansa hankkeesta tässä vaiheessa, ja siirtyminen fossiilipohjaisesta vedystä vihreään vetyyn arvioidaan alkavan vasta vuoden 2030 jälkeen. KEITO:n WEM- ja WAM-skenaarioissa kuitenkin oletettiin, että irtautuminen fossiilisesta öljynjalostuksesta toteutuisi pitkällä aikavälillä, mutta PEIKKO-hankkeen WEM-P-oletuksiin nähden viivästetysti siten, että fossiilisen öljynjalostuksen alasajo toteutuisi lähes täysimittaisesti vasta 2050. WEM- ja WAM-skenaariossa on lisäksi oletettu, että uusiutuvalla vedyllä korvataan fossiilista vetyä, jota käytetään öljynjalostusprosesseissa. Nesteen tuotannon osalta on haasteellista arvioida, kuinka suuri osuus tulevan 3 milj. t vuosituotannosta perustuisi uusiutuviin raaka-aineisiin ja kuinka suuri toisaalta kierrätettyihin syöttöaineisiin, esim. kierrätysmuoviin. Nykyisellä Kilpilahden jalostamolla uusiutuvien polttoaineiden tuotanto on noin 0,4 Mt vuodessa. Lisäksi on oletettu, että Neste investoisi pyrolyysilaitokseen, jonka kapasiteetti on 150 000 t/a ennen vuotta 2030.

³ Outokumpu (2023). Lehdistötiedote 18.12.2023. Outokumpu rakentaa Tornioon biokoksin briketointilaitoksen nopeuttaakseen suorien päästöjen vähentämistä. <https://www.outokumpu.com/fi-fi/news/2023/outokumpu-rakentaa-tornioon-biokoksin-briketointilaitoksen-nopeuttaakseen-suorien-paastojen-vahentamista-3375120>

⁴ Bioenergia ry (2025). Hankkeet kartalla: Bio-CCUS & biohiili. Saatavilla: [Bio-CCUS & biohiili – Bioenergia ry](#)

⁵ Neste (2023). Nesteen Porvoon öljynjalostamo muutetaan asteittain uusiutuvien ja kiertotalousratkaisujen jalostamoksi. Tiedotteet ja julkaisut 20.12.2023. Saatavilla: <https://www.neste.fi/tiedotteet-ja-uutiset/vastuullisuus/nesteen-porvoon-oljynjalostamo-muutetaan-asteittain-uusiutuvien-ja-kiertotalousratkaisujen-jalostamoksi>

Talouselämän⁶ haastattelussa Neste kertoi tähtäävänsä 1 Mt/a jätemuovikapasiteettiin pyrolyysilaitoksellaan, mikä otettiin huomioon WEM- ja WAM-skenaariossa, kuten jo PEIKKO-hankkeen WEM-P-skenaariossa.

Mineraaliteollisuuden osalta WEM- ja WAM-oletukset noudattivat PEIKKO WEM-P-oletuksia. Sementin valmistuksen oletettiin kasvavan keskimäärin 1,1 % vuodessa vuoteen 2050 saakka ja myös poltetun kalkin kotimaisen valmistuksen oletettiin muutoin kasvavan maltillisesti, mutta Raahan terästehtaan prosessimuutokset vähentävät kokonaistuotantoa huomattavasti 2030–2040.

Teollisuuden osalta puhtaan energian ja päästöjen vähentämiseen liittyvä kehitys näyttää kokonaisuutena lupaavalta, vaikka investointien toteutumiseen liittyy hyvin suuria epävarmuuksia. Investoinnit sähkökattiloihin ovat edenneet ripeästi ja teollisuuden irtautuminen fossiilisten polttoaineiden käytöstä sähköistymisen myötä edistyy. KEITO-hankkeen toisessa, syksyllä 2025 ilmestyvässä raportissa esitetään synteisi toimialojen vähähiilisyystiekartoista, jossa teollisuuden suunnitelmia arvioidaan tiekarttojen näkökulmista ja erilaisissa tulevaisuuden poluissa.

2.3.2 Kaivannaisteollisuuden kehitys

Kaivosteollisuudella on Suomessa pitkä historia alkaen rautamalmien louhinnasta Ruotsin kuningaskunnan käyttöön, edeten Outokummun kuparikaivostoimintaan ja sen vauhdittamaan metalliteollisuuden kehittymiseen ja nyt käynnissä olevan energiasiirtymän materiaaliisiin tarpeisiin vastaamiseen. Tänä aikana louhittavien malmien ominaisuudet ovat muuttuneet ja arvoaineiden talteenottomenetelmät kehittyneet huomattavasti.

Tällä hetkellä Suomi on EU:ssa merkittävä kaivostuotannon maa ja viiden metallin (kromi, koboltti, platina, palladium, nikkeli) joko ainoa tai suurin tuottaja. Kaivosalan yritysten liikevaihto vuonna 2022 oli yhteensä 2,93 miljardia euroa. Kasvua edelliseen vuoteen oli noin 0,5 miljardia euroa. Kaivosteollisuuden toiminnot sijoittuvat usean toimialaluokan alle, riippuen kunkin kaivostoimintaa sisältävän teollisuusalueen eniten arvonnousua tuottavasta toiminnasta. Useilla kaivoksiksi usein käsitetyillä teollisuusalueilla on integroitunutta jalostustoimintaa, jolloin nämä alueet sijoittuvat toimialaluokituksessa joko metalliteollisuuden tai kemianteollisuuden toimialoille. Toimipaikat, joissa kaivostoiminta on tärkein arvonnousua tuottava toiminta, sijoittuvat toimialaluokituksessa luokkaan B 'Kaivostoiminta ja louhinta'.

Koko mineraaliklusteria tarkasteltaessa liikevaihdolla mitattuna ylivoimaisesti merkittävin toimiala vuonna 2022 oli metallin jalostus lähes 24 miljardin liikevaihdolla. Suomi jalostaa huomattavasti enemmän metalleja kuin mitä maan

⁶ Talouselämä (2023). Neste investoi 2,5 miljardia Porvooseen. Porvoon öljynjalostamo muutetaan asteittain uusiutuvien ja kiertotalousratkaisujen jalostamoksi. Artikkelin 12.12.2023, Saatavilla: <https://www.talouselama.fi/uutiset/neste-investoi-2-5-miljardia-porvooseen/26927090-0d2a-4b18-97c3-06241b6001bd>

kaivoksista louhintana tuotetaan eli jalostettavia rikasteita tuodaan merkittävässä määrin ulkomailta.

Kaivosteollisuutta palvelevilla aloilla liikevaihdon trendi on seurannut päätoimialan kehitystä. Yleistrendi henkilöstömäärien osalta kaivostoiminnassa, metallin jalostuksessa sekä näitä toimintoja palvelevissa yrityksissä on ollut vakaasti kasvavaa viimeisen 15 vuoden ajan, vaikka ajanjaksolle mahtuu jonkin verran suhdannevaihtelua. (Vasara ym. 2023).

Yritystoiminta ja investoinnit

Suomessa vuonna 2024 yhteensä 60 yhtiötä raportoi Turvallisuus- ja kemikaalivirastolle malminetsinnästä ja 22 yhtiötä louhinnasta (Tukes 2025a). Malminetsintäyhtiöt investoivat mineraalien etsintään 91 miljoonaa euroa (laskua - 4 % vuodesta 2023). Malmietsintäkairausta tehtiin 255 km (laskua -11 % vuodesta 2023). Investoinnit kohdistuvat edelleen pääosin perusmetallien, eli nikkelin ja kuparin sekä kullan etsintään. Yritykset investoivat ympäristöselvityksiin ja luontovaikutusten arviointeihin 4,7 miljoonaa euroa, kun vastaava luku oli vuosina 2022 ja 2023 noin 0,8 miljoonaa euroa. Myös maaomistajille maksettavien korvausten määrä on noussut 8,1 miljoonan euroon (19 % vuodesta 2023). Tästä yli puolet maksettiin Metsähallitukselle, joka on Lapissa suurin maanomistaja. Noin 75 % malminetsinnästä tapahtuu Lapin maakunnassa, mutta etsintä on hitaasti laajentumassa myös muiden maakuntien alueille (Pohjois-Pohjanmaa, Pohjois-Karjala, Keski-Pohjanmaa, Pohjois-Savo, Pohjanmaa ja Kainuu) mahdollisesti akkuteknologioiden mineraalien kysynnän takia. (Tukes 2025a)

Kaivosyhtiöiden investoinnit louhintahankkeisiin olivat 449 miljoonaa euroa (18% nousua vuodesta 2023). Merkittävimmät investoinnit tehtiin Terrafamen (sinkki, kupari, nikkeli, uraani) sekä toimintaa aloittelevan Keliberin Rapasaaren (litium) kaivoksilla. Isoja investointeja tehtiin myös Siilijärven (fosfori), Kittilän (kulta) ja Kemin (kromi) kaivoksilla. Kaivosten kokonaislouhinta oli 120,8 Mt (laskua -6 % vuodesta 2023), malmi- ja hyötykiven osuuden ollessa 44,3 Mt (laskua -5 % vuodesta 2023). (Tukes 2025a)

Kaivostoiminnan tulevaisuuden näkymät ja huomioiminen skenaarioissa

Kaivostoiminnassa uusi yritystoiminta kehittyy hitaasti johtuen mineraaliesiintymien etsinnän, määrän ja laadun varmistamisen sekä lupamenettelyjen vaatimasta ajasta. Valtaosa alkuvaiheen etsintähankkeista ei etene kaivoksiksi saakka. Kaivostoiminnassa toiminta tietyllä paikkakunnalla tai kohteella myös loppuu aikanaan mineralisaation ehtyessä. Uusien kaivoshankkeiden käynnistäminen mineralisaation löytymisestä tuotannon aloitukseen kestää EU:ssa keskimäärin 15 vuotta. Tukes:n mukaan prosessi Suomessa malminetsinnän aloituksesta ympäristövaikutusten arviointiprosessin käynnistämiseen (YVA) on vähintään 15 vuotta (Tukes 2025b). Esimerkiksi Kittilän kultakaivoksen tapauksessa mineraaliesiintymä löytyi vuonna 1986 ja tuotanto käynnistyi 2008, eli prosessi kesti 22 vuotta. Kevitsan monimetalliesiintymä löytyi

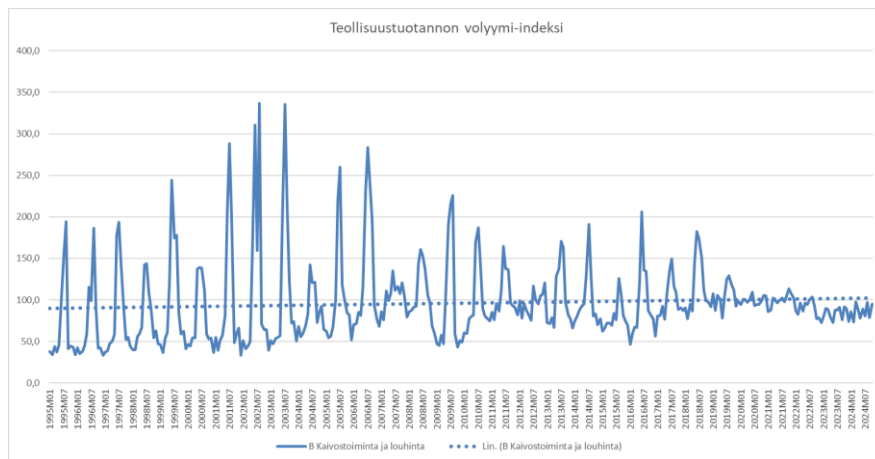
1987 ja kaupallinen tuotanto käynnistyi 2012 eli prosessi kesti 25 vuotta. Kumpikin esimerkkitapauksista on valmisteltu vanhan 1965 säädetyn kaivoslain mukaisesti.

Tästä syystä mahdollisesti uusiksi kaivoksiksi keskipitkällä aikavälillä etenevät hankkeet voidaan varsin luotettavasti tunnistaa 20 vuoden aikaikkunassa. Lähimpänä kaivostoiminnan aloittamista Suomessa on neljä kaivoshanketta (Friedrichs ym. 2025): Keliber Oy:n litiumtoiminnot sekä AA Sakatti Mining Oy:n, Suhanko Arctic Platinum Oy:n ja Eurobattery Minerals Ab:n monimetallikaivosprojektit. Näistä Keliber Oy:n ja AA Sakatti Mining Oy:n hankkeet ovat saaneet EU:n strategisen hankkeen statuksen (Valtioneuvosto 2025a). Jos nämä kaivoshankkeet toteutuisivat suunnitellusti, nikkelin ja koboltin kotimainen kaivostuotanto kaksinkertaistuisi ja kuparin kolminkertaistuisi 2030-luvulla (Friedrichs ym. 2025). Lisäksi Suomesta tulisi merkittävä litiumhydroksidin (akkukemikaali) tuottaja EU:ssa. Lisäksi jo käynnissä oleviin kaivoshankeisiin voi tulla tuotantokapasiteettia nostavia laajennuksia, mistä esimerkkinä toimii Terrafamen Kolmisoppi-esiintymä, jolla on myös EU:n strategisen hankkeen status. Lisääntyvä kotimainen kapasiteetti todennäköisesti vähentää metalliteollisuuden käyttöön ulkomailta tuotavan mineraaliraaka-aineen tarvetta tulevaisuudessa ja lisää siten omavaraisuutta näistä raaka-aineista. Strategisen hankkeen asema tullee vauhdittamaan sen saaneiden hankkeiden käynnistymistä, jos edellytykset lupamenettelyjen ja kannattavuuden suhteen muuten täyttyvät.

Edellä mainittujen hankkeiden lisäksi Suomessa on vireillä alkuvaiheen etsintä- ja kaivoshankkeita, joiden kannattavuutta ja toteuttamisen reunaehtoja tutkitaan parhaillaan yritysten toimesta. Nämä toimivat pohjana tulevaisuuden kaivostoiminnalle 2040- ja 2050-luvuilla. Näistä hankkeista esim. Suomen malmijalostuksen edistämä Soklin kaivoshanke saattaa edetä energiasiirtymän raaka-ainepohjaa tukevaksi kaivokseksi 2040-luvulle mentäessä tai jo aiemmin. Toisaalta tämän hetken isoista kaivoksista Boliden Oy Ab:n Kevitsan toiminta on loppumassa 2030-luvun puolivälissä, ellei alueelta tunnisteta lisää kaupallisesti hyödynnettäviä mineraaliesiintymiä. Näin ollen nykyisten tiedossa olevien hankkeiden valossa kaivostoiminnan kapasiteetti ei välttämättä tule Suomessa nousemaan merkittävästi 2040-luvulla. Malminetsinnässä on yleisesti ottaen havaittavissa trendi, jossa isoja malmiesiintymiä löydetään harvemmin, löydettyjen esiintymien arvoainepitoisuudet ovat alhaisempia ja esiintymät sijaitsevat yhä syvemmällä maan kuoressa. Köyhemmät, vaikeasti louhittavat, rikastettavat ja jalostettavat malmit lisäävät taloudellisia, teknisiä, ympäristöllisiä ja sosiaalisia haasteita esiintymän hyödyntämisen koko elinkaaren ajalle ja tekevät toiminnasta myös luvituksen kannalta haastavampaa.

Edellä kuvattu kehityskulku ennakoi kaivosalalle kasvua tuleville vuosikymmenille. Kasvun määrittäminen WEM- ja WAM-skenaarioihin on kuitenkin haastavaa toiminnan sijoituessa useille toimialoille sekä uusiin kaivoshankkeisiin liittyvien epävarmuuksien vuoksi. Kuva 3 esittää teollisuustuotannon volyymin indeksin kehittymisen kaivostoiminnan ja louhinnan toimialalla vuosina 1995–2024. Trendi on hienoisesti nouseva tarkastelujakson läpi. Lisäksi Teknologiateollisuus on vähähiilitiekartoissaan vuodelle 2035 (Pöyry 2020, Vassinen ym. 2024) arvioinut kaivannaisalan kasvuennusteeksi +0,5 %/v ja BAU-

energiatehokkuusparannukseksi +0,2 %/v. Tätä Teknologiateollisuuden esittämää kasvuarvioita päädyttiin käyttämään myös WEM- ja WAM-skenaarioissa kaivostoiminnan osalta.



Kuva 3. Teollisuustuotannon volyymi-indeksin kehitys "B Kaivostoiminta ja louhinta" toimialalla vuosina 1995–2024.

2.3.3 Hiilidioksidin talteenotto ja tekniset hiilinielut

WAM:ssa on arvioitu, että vuoteen 2030 mennessä on saatu käyttöön joko EU:n asettama ohjausmekanismi tai Suomen valtion käyttöönotettava tukitoimi, jolla edistetään teollisen kokoluokan investointeja teknisiin hiilinieluihin. Samoin kuin luonnon hiilinieluilla, myös teknisillä hiilinieluilla voidaan laskennallisesti kompensoida KHK-päästöjä, joiden vähentäminen on hyvin kallista tai jopa mahdotonta. Tekninen hiilinielu syntyy, kun bioperäisestä savu- tai prosessikaasusta tai ilmakehästä otetaan hiilidioksidia talteen ja varastoidaan se pysyvästi esimerkiksi geologisiin varastoihin, kuten suolavesikerrostumiin tai vanhoihin öljy- ja kaasulähteisiin. Ensimmäistä kutsutaan BECCS- (bioenergy carbon capture and storage) ja jälkimmäistä DACCS (direct air carbon capture and storage) -teknologiaksi. Lisäksi on muita hiilidioksidin tai hiilen varastointikeinoja, kuten varastointi betoniin, maaperään hiilenä, tai kiviainekseen karbonaattina, mutta näiden osalta potentiaalit Suomessa ovat verrattain pienet tai vaihtoehtoisesti mallinnukseen ei ollut saatavilla riittävästi lähtötietoja. DACCS on lisäksi kalliimpi teknologia BECCS:ään verrattuna, joten WAM-skenaarioissa kaikki tekniset hiilinieluinvestoinnit olivat BECCS:ää. Tulevassa KEITO-raportissa, joka liittyy pitkän aikavälin ilmastokeskusteluihin, on osaan vaihtoehtoisia skenaariotarkasteluita sisällytetty myös mahdollisuus investoida DACCS:in.

WAM-tarkasteluissa päästöoikeuden hinta nousee vuoden 2030 jälkeen tasolle, jossa investoinnit BECCS:ään olisivat kannattavia, mikäli oletetaan negatiivisille

päästöille täysi päästöoikeuden hinnan suuruinen hyvitys. Investointien toteutumiseen liittyy kuitenkin suurta epävarmuutta paitsi puuttuvan ohjauspolitiikan myös hiilidioksidin kuljetukseen ja varastointiin liittyen Suomen rajojen ulkopuolelle, koska Suomessa ei löydy hiilidioksidin varastointiin soveltuvia geologisia muodostelmia. Näin ollen teknisille hiilinieluinvestoinneille on asetettu ylärajat, joita on alla kuvattu tarkemmin.

Vantaan energian tavoitteena on ottaa kierrätyskelvottoman jätteen lämpökäsittelystä syntyvä hiilidioksidi talteen vuoteen 2035 mennessä. WAM-skenaariossa oletettiin tämän investoinnin toteutuvan. Laskelmissa on oletettu, että puolet jätteen hiilestä on bioperäistä ja puolet fossiilista ja että noin 0,6 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuodessa kuljetettaisiin Norjanmeren geologiseen varastoon ennen vuotta 2035. Vuoden 2035 jälkeen oletetaan BECCS-investointien toteutuvan pääsoin metsäteollisuuden prosessien yhteydessä siten, että BECCS-toiminta voi kasvaa vuoden 2035 noin 1,5 Mt/a:n enimmäistasosta vuoteen 2040 mennessä enimmillään noin 3 Mt/a:n tasoon ja vuoden 2050 tienoilla enimmillään noin 14 Mt/a:n tasoon. Bioperäisen hiilidioksidin talteenoton lisäksi oletetaan, että sementtiteollisuuden fossiiliperäinen hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan. Fossiilisen hiilidioksidin talteenoton osalta mallinnukseen on asetettu minimitaso 0,4 Mt/a vuonna 2035 ja maksimitaso 0,8 miljoonan tonnin vuotuinen talteenotto ja varastointi.

Talteen otetun bioenergiapohjaisen tai muun hiilidioksidin hyötykäyttö CCU (tai BECCU, bioenergy with carbon capture and utilisation) eritoten sähköpoltto-aineiden tuotantoon on myös huomioitu skenaariomallinnuksessa. Hiilidioksidin hyötykäyttö johtaa kuitenkin useimmiten hiilidioksidin vapautumisen takaisin ilmakehään esimerkiksi polttoaineen polton yhteydessä, jolloin kyse ei ole teknisestä hiilinielusta, vaan nollapäästäisistä prosesseista tai teknologiasta.

Verrattaessa edellä esitettyjä teknisten hiilinielujen maksimirajoja luvussa 3.3 esitettyyn mallinnustulokseen nähdään, että optimoinnin tuloksena saadut BECCS-kapasiteetit ovat hyvin lähellä edellä esitettyjä maksimirajoja.

2.3.4 Energian ja polttoaineiden tuotanto

Energian ja polttoaineiden tuotantoa koskevat oletukset perustuvat WEM-skenaariossa suurilta osin PEIKKO-raportin WEM-P-skenaarioon (Koljonen ym. 2024). Tuuli- ja aurinkovoimahakkeiden osalta kehitys on kuitenkin ollut hyvin nopeaa ja KEITO-hankkeen aikana kehitystä on seurattu Suomen uusiutuvat ry:n sivuston tietojen pohjalta (Suomen uusiutuvat 2025a, 2025b, 2025c). Kannattaa kuitenkin huomata, WEM- ja WAM-skenaarioiden laskenta on ajoittunut 2024–2025 vuosien vaihteeseen, ja jo nykytilan arvioon liittyy epävarmuutta.

Suunnittelu- ja esisuunnitteluvaiheessa olleita maatuulivoimahankkeita oli tammikuussa 2025 yli 61 600 MW:n ja merituulivoimahankkeita yli 46 100 MW:n edestä (Suomen uusiutuvat 2025c). On kuitenkin selvää, että kaikki hankkeet eivät etene toteutukseen. Hankkeiden kannattavuutta heikentää esimerkiksi tuulivoiman kannibalisaatio, kun sähkön saatavuus kasvaa tarpeeseen nähden, jolloin myös sähkön markkinahinnat laskevat ja uusien investointien kannattavuus heikkenee.

Spot-markkinoille myytäessä tuulivoimasta saatu tulo olisi vuonna 2024 ollut ainoastaan 66 % verrattuna tasaisesta tuotannosta saatuu tuloon. Vastaavasti aurinkosähkö olisi saanut 85 % keskimääräisestä markkinahinnasta vuonna 2024. Suurin osa tulevista tuulivoimahankkeista kuitenkin rakennetaan kohtaamaan uutta kysyntää Power Purchase Agreement (PPA)-tyyppisten sopimusten pohjalta.

Vuonna 2025 saavutetaan vähintään noin 9450 MW taso rakenteilla olevien ja päätettyjen maatuulivoimahankkeiden myötä (Suomen uusiutuvat 2024a)⁷. Vuoden 2025 jälkeen maatuulivoiman kehitys on skenaariomallinnuksessa täysin markkinaehtoinen ja optimoinnin tulos. Merituulivoimaa Suomessa oli vuonna 2024 42 MW. WEM- ja WAM-skenaariot sisältävät positiivisen tukipäätöksen saaneen Tahkoluotoon tulevan pienen 30 MW:n merituulipuiston, joka on suunniteltu valmistuvaksi vuoden 2025 jälkeen. Muilta osin merituulivoiman kehitys on skenaariomallinnuksessa markkinaehtoinen.

Aurinkovoiman kehityksessä hyödynnetään Elinkeinoelämän keskusliiton (EK 2024b) keräämää vihreän siirtymän hankkeiden listausta isojen aurinkovoimaloiden osalta⁸ täydennettynä erinäisten yhtiöiden vuoden 2024 lopussa esillä olleilla suunnitelmissa. WEM-skenaario sisältää päätetyt, aloitetut ja 80 % tuetuista hankkeista sekä 10 % suunnitteluvaiheessa olevista 2026–2030 hankkeista. Pienissä aurinkovoimainstallaatioissa oletetaan WEM:ssä kasvuksi 240 MW vuodessa. Arvioitu kapasiteetti vuonna 2025 olisi näin ollen minimissään noin 2000 MW ja vuonna 2030 noin 4400 MW. Yllä esitetyt arviot ovat TIMES-VTT-mallinnuksessa aurinkoenergiainvestointien minimitasoja ja malli optimoi markkinaehtoiset investoinnit, jotka voivat siten ylittää esitetyt minimiarviot. Lisäksi EU:n energiatehokkuusdirektiivin (Energy Efficiency Directive, EED) ja rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) (2024) käyttöönotto vuonna 2024 vaikuttaa muun muassa aurinkoenergian tuotantoon uusissa ja olemassa olevissa rakennuksissa, jota on käsitelty tarkemmin luvussa 2.4.6.

Ydinvoiman osalta on WEM:ssä oletettu, että nykyinen kapasiteetti säilyy aina vuoteen 2055 asti, kun PEIKKO-hankkeen oletusten mukaan tuotantokäytössä vuonna 2050 oli ainoastaan Olkiluodon 2- ja 3-yksiköt. Lisäksi WEM-oletusten mukaan Olkiluoto 1- ja 2-yksiköille tehdään kullekin 80 MW:n tehonkorotus 2030 mennessä markkinaehtoisesti.

WAM-skenaariossa oletetaan, että tukimekanismien ja/tai lakimuutosten kautta investoitavan kahteen uuteen 500 MW ydinlauhdeyksikköön vuosina 2035 ja 2045.

Lämmön tuotannon investointien osalta seurataan PEIKKO-hankkeen WEM-P-skenaariota tietyin muutoksin liittyen pääasiassa Elinkeinoelämän keskusliiton dataikkunan päivityksiin 2024–2025 (EK 2024b, EK 2025). Lähivuosina kaukolämmön sähkökattilakapasiteetti nousee jo 2000 MW:iin (Fingrid 2024a). Uudet lämpöpumppupohjaiset ratkaisut tuovat WEM:ssä 300 MW:n edestä uutta

⁷ Rakenteilla olevat hankkeet 2024–2026 (päivitys 30.6.2024)

⁸ 30.10.2024 mukaisesti

kaukolämpöä vuoteen 2025 mennessä ja 450 MW:n edestä vuoteen 2030 mennessä. Hukkalämmön lähteitä löytyy entistä enemmän verrattuna PEIKKO-hankkeen aikana laadittuihin arvioihin muun muassa kasvaneiden investointiarvioiden myötä liittyen datakeskuksiin. Hukkalämmön määrää tulevaisuudessa on hyvin vaikea arvioida. Esimerkiksi datakeskusten osalta on saatavilla niukasti tietoa, jonka perusteella voidaan arvioida tulevaa hukkalämpökehitystä. Mallinnusoletuksia liittyen datakeskuksiin on esitelty luvussa 2.4.10.

WAM-skenaariossa oletetaan lisäksi investoitavan kahteen lämpöteholtaan 500 MW SMR⁹-ydinlämpökattilalaitokseen vuosina 2035 ja 2045. Investointien taustalla on oletus ydinenergiatuotannon edistämisen mukaan lukien ydinenergiain muutos.

Jätteenpolttolaitosten osalta oletetaan, että Suomeen ei enää investoida uusia laitoksia, mutta olemassa olevat laitokset olisivat edelleen käytössä niiden laskennallisen käyttöiän loppuun. Kuten PEIKKO-hankkeen WEM-oletuksissa, myös KEITO:n WEM- ja WAM-oletuksissa jätteen tuonnin Suomeen on oletettu jatkuvan olemassa olevien jätteenpolttolaitosten käyttöiän loppuun, mikäli kotimaassa syntyvän jätteen määrät eivät riitä laitosten tarpeisiin nähden.

Sähköpolttoaineiden valmistuksessa oletetaan WEM:ssä ja WAM:ssa, että investointi- ja/tai tukipäätöksen saaneet hankkeet toteutetaan. Vuoteen 2025 mennessä käytetään jo 40 MW sähköä metaanin tuotantoon ja vuonna 2030 siihen kuluu sähköä 300 MW:n edestä. Useat kaukolämpölaitokset ovat ilmoittaneet myös investoivansa metaanin tuotantoon, jolloin vedyn tuotantoprosessin hukkalämpö hyödynnetään kaukolämpönä. Mallinnuksessa on oletettu, että kolme tällaista investointia toteutuu, joiden yhteenlaskettu kaukolämmön tuotanto olisi 1400 GWh.

2.4 Taakanjakosektorin kehitykset

2.4.1 Tieliikenteen kehitys

Tieliikenteen WEM-skenaario perustuu suurilta osin PEIKKO-raportin WEM-P-skenaarioon (Koljonen ym. 2024), mutta skenaarion lähtötietoja ajoneuvokannan ja muiden lähtötietojen osalta muokattiin vastaamaan vuoden 2023 tilastoja. WEM-P-skenaariossa henkilöautoliikenteen oletettiin sähköistyvän nopeasti, joka Traficom:in ennusteen (Traficom 2024d) mukaisesti lisäisi henkilöautosuoritteita. KEITO:n WEM-skenaariossa täyssähköautoja olisi liikenteessä yli 690 000 ja lisäksi hybridi-autoja reilut 290 000 vuonna 2030 sekä vastaavasti vuonna 2050 reilusta neljästä miljoonasta henkilöautosta yli 3,3 miljoonaa olisi täyssähköautoja. Henkilöautosuoritteen oletettiin kasvavan vuodesta 2023 vuoteen 2030 reilu 9 % ja vuoteen 2050 mennessä jopa 37 %. PEIKKO-hankkeen WEM-Low-skenaariossa oletettiin maltillisempi suoritteen kasvu ja hitaampi sähköistyminen,

⁹ SMR: small modular reactor eli pieni modulaarinen ydinreaktori

joka saattaisi nykytiedon valossa vastata paremmin arvioita tulevaisuuden kehityksestä. Toisaalta Tilastokeskuksen uusi väestöennuste (2024) olettaa suuremman väestön kasvun, kuin mitä KEITO:n WEM-skenaarion taustalla oli käytetty, joten tästä näkökulmasta WEM-skenaarion oletukset ovat perustellut.

Tieliikenteen WAM-skenaariossa mallinnetut toimenpiteet jakautuvat kolmeen kategoriaan, jotka sisältävät seuraavat toimenpiteet:

- **Kestävä liikenne:** Kestävän liikenteen edistäminen yhteistyössä valtion ja kuntien kesken (MAL-sopimukset), kävelyn ja pyöräilyn investointiohjelma, joukkoliikenteen valtionavustukset
- **Jakeluvelvoite:** jakeluvelvoitteen maltillistaminen ja liikennesähkön sisällyttäminen jakeluvelvoitteeseen
- **Hankintatuet ja romutuspalkkio:** raskaan kaluston hankintatuki mikroyrityksille, sähkö-, kaasu- ja vetykäyttöisten kuorma-autojen hankintatuet sekä Romutuspalkkio vähäpäästöisen käytetyn auton hankintaan

Toimenpiteiden vaikutusarviot perustuvat Traficomien muistioihin (2024a, 2024b, 2024c). Mallinnusta varten niihin on tehty täsmennyksiä oletuksia, joita on esitetty alla.

ELIISA-mallinnuksessa huomioitiin seuraavat toimenpiteet:

- *Raskaan kaluston hankintatuet* lisäävät sähkö- ja kaasukäyttöisten ajoneuvojen ensirekisteröintejä ja vähentävät vastaavasti polttomootorikäyttöisten ajoneuvojen ensirekisteröintejä.
- *Romutuspalkkio* vähäpäästöisen käytetyn auton hankintaan vaikuttaa ajoneuvokantaa uudistavasti siten, että sekä uusien että käytettynä maahantuotujen henkilöautojen määrät nousevat sekä tavanomaista suurempi määrä vanhoja autoja romutetaan.
- *Kestävän liikenteen edistämiseen* vaikuttavat toimenpiteet vähentävät henkilöautojen suoritetta ja lisäävät bussien suoritteita.

KEITO-hankkeen WAM-skenaarioon sisällytettyjen toimenpiteiden vaikutukset ajoneuvokantaan ja liikennesuoritteisiin ovat pienet. Toimenpiteistä ylivoimaisesti suurin vaikutus tieliikenteen päästöjen kehitykseen on jakeluvelvoitteella, johon kohdistuu edellä esitetty kaksi toimenpidettä: jakeluvelvoitteen keventäminen vuosina 2024–2027 sekä julkisesti ladatun uusiutuvan sähkön sisällyttäminen jakeluvelvoitteeseen. Jakeluvelvoitteen suuruudet WEM- ja WAM-skenaariossa on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Jakeluvelvoite WEM- ja WAM-skenaarioissa (Finlex 2024).

Vuosi	WEM	WAM
2023	13,5 %	13,5 %
2024	28,0 %	13,5 %
2025	29,0 %	16,5 %
2026	29,0 %	19,5 %
2027	30,0 %	22,5 %
2028	31,0 %	31,0 %
2029	32,0 %	32,0 %
2030–2060	34,0 %	34,0 %

Päivitetty laki uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä (Finlex 2024) sisältää paitsi edellä esitetyn jakeluvelvoitteen maltillistamisen myös uusiutuvan liikennesähkön sisällyttämisen jakeluvelvoitteeseen. Lain mukaan uusiutuvan liikennesähkön energiasisällön lasketaan täyttävän jakeluvelvoitetta kolminkertaisena. Jakeluvelvoitteeseen kuuluvan sähkön energiasisältö (jakeluvelvoitteen laskennan osoittaja) laskettiin kaavalla:

$$\text{tieliikenteen sähkönkulutus} * \text{julkisesti ladatun sähkön osuus} * \text{uusiutuvan sähkön osuus kaikesta sähkönkulutuksesta} * \text{kerroin } 3$$

Tieliikenteen kokonaisenergiantarve (jakeluvelvoitteen laskennan nimittäjä) laskettiin kaavalla:

$$\text{muiden polttoaineiden energia} + (1 - \text{julkisen uusiutuvan sähkön energia}) + \text{julkisen uusiutuvan sähkön energia} * 3$$

Julkisesti ladatun sähkön osuudesta kaikesta tieliikenteeseen ladatusta sähköstä käytettiin arviota 20 % (Sipilä ja Lottonen 2024). Uusiutuvan sähkön osuus kasvaa vuoden 2025 60 %:sta 80 %:iin vuoteen 2050 mennessä.

ELIISA-malli laskee sähköajoneuvojen vuosittaisen sähkönkulutuksen ajoneuvokannan, suoritteen ja kulutuskertoimien perusteella. Jakeluvelvoitteen noudattamista laskettaessa malli huomioi julkisesti ladatun uusiutuvan liikennesähkön energiamäärän kolminkertaisena.

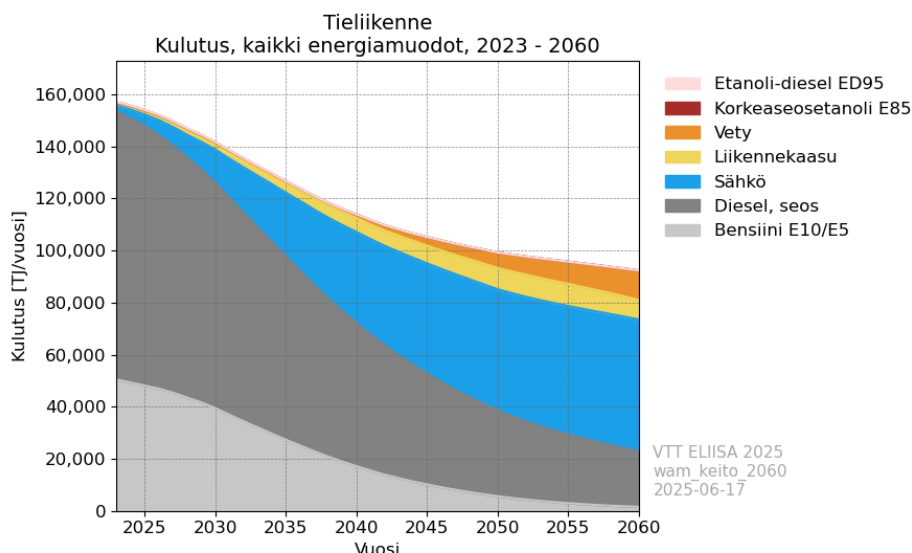
Liikennekaasun bio-osuudeksi energiamäärästä on oletettu 99 %. Biometaaniin ei oleteta juuri kasvua nykytilanteeseen verrattuna. Vuodesta 2025 alkaen jakeluvelvoitteen täyttämiseen tarvittava energiamäärä toteutetaan ensisijaisesti julkisesti ladatulla liikennesähköllä, minkä jälkeen puuttuva osuus toteutetaan biodieseliillä. Biodieselin osuus dieselin energiasta on mallin mukaan korkeimmillaan noin vuonna 2030, minkä jälkeen biodieselin käyttö vähenee sähköenergian kasvun myötä. Biodieseliä ei mallin mukaan tarvita vuoden 2045

jälkeen jakeluvelvoitteen täyttämiseksi. Vuonna 2045 sähköenergia myös nousee suurimmaksi energialähteeksi, ja sen määrän yhä kasvaessa jakeluvelvoitteen korkein tavoitetaso (34 %) ylittyy.

Dieselin bio-osuuteen lasketaan ELIISA-mallissa kaikki tieliikenteessä myytävä diesel-polttoaine, standardin EN590-mukainen seos sekä biopolttoaineena myytävä uusiutuva diesel. Uusiutuvan dieselin käyttöä ei ole erikseen mallinnettu, jonka vuoksi dieselseoksen bio-osuus mallissa ylittää standardin mukaisen seoksen ominaisuuksien rajaaman enimmäisarvon.

Vaikutukset energiankulutukseen ja päästöihin

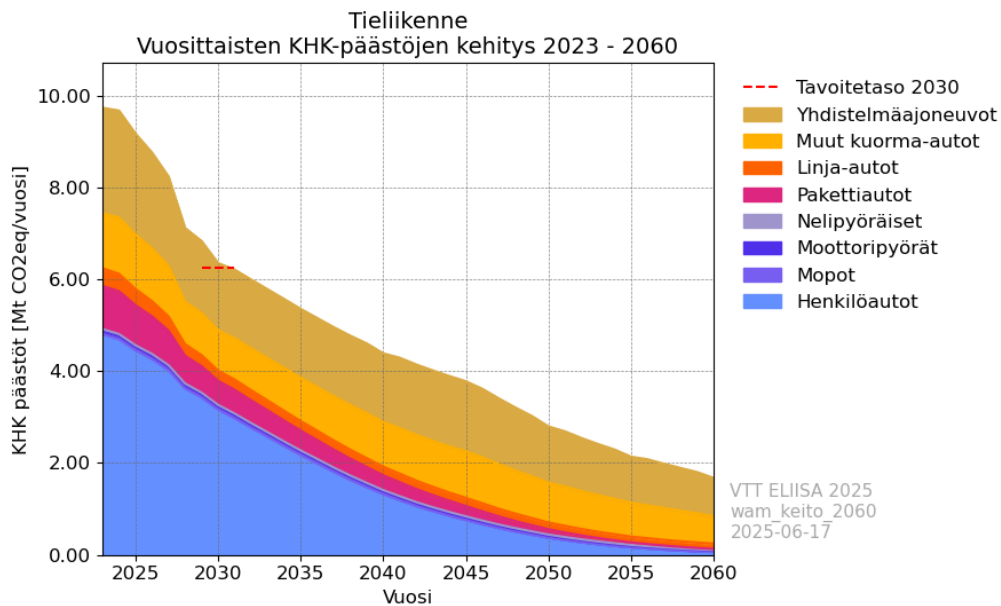
Tieliikenteen kokonaisenergiankulutus vähenee merkittävästi tarkastelujaksolla (kuva Kuva). Fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee voimakkaasti ja sähköenergian kulutus tieliikenteessä kasvaa tasaisesti koko ajanjakson ajan.



Kuva 4. Energiankulutuksen kehitys polttoaineittain tieliikenteen WAM-skenaariossa vuosina 2023–2060.

Tieliikenteen kasvihuonekaasupäästöt vähenevät laskien yli 10 miljoonasta hiilidioksidiekvivalenttitonniasta ($\text{Mt CO}_2\text{-ekv./v}$) noin $6,4 \text{ Mt CO}_2\text{-ekv./v}$ 2030 ja alle $2 \text{ Mt CO}_2\text{-ekv./v}$ tasolle vuoteen 2060 mennessä (kuva 5). On kuitenkin huomattava, että WAM-skenaariion energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat korkeampia kuin WEM-skenaariossa. Vuonna 2060 WAM-skenaariion kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 16 % korkeammat kuin WEM-skenaariossa (WEM: 1,43 miljoonaa tonnia $\text{CO}_2\text{-ekv.}$, WAM: 1,66 miljoonaa tonnia $\text{CO}_2\text{-ekv.}$). Vuosien 2024–2027 osalta kasvu selittyy jakeluvelvoitteen maltillistamisella, mikä

lisää fossiilisen dieselin määrää. Pidemmillä aikavälillä eron aiheuttaa julkisesti ladatun uusiutuvan liikennesähkön sisällyttäminen jakeluvelvoitteeseen ja sen energiasisällön painottaminen kolminkertaisena.



Kuva 5. Vuosittaisten kasvihuonekaasupäästöjen kehitys ajoneuvotyypeittäin tieliikenteen WAM-skenaariossa vuosina 2023–2060.

2.4.2 Vesiliikenne

Vesiliikenteen skenaariot on laskettu VTT:n MEERI-mallilla. MEERI on Suomen vesiliikenteen suorien pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentamalli, jota hyödynnetään Suomen liikenteen päästöinventarioiden laskennassa.

Meriliikenteen perusennusteen päivityksessä on hyödynnetty Traficomien kansallista meriliikenteen ennustetta (Moilanen ym. 2022). Sisävesi- ja huviveneliikenteen osalta venemallin ennusteissa on arviot vesikulkuneuvojen suoritekehitykselle ja päästökertoimien kehityksille. Meriliikenteen kulutusennusteissa suoritteiden kehitystä kuvaa yksinkertaistetusti satamassakäyntien määrä, joka päivitetään vuosittain inventaariolaskennassa. Satamassakäyntimäärien kehitys perustuu oletukseen, että Traficomien suoriteennusteen (2022) kuljetettujen tonnimäärien kehitys vaikuttaa suoraan verrannollisesti satamassakäyntimääriin.

Kotimaan vesiliikenteeksi rajataan kuuluvaksi kotimaan satamien välinen liikenne sisävesi- ja merialueilla. Ulkomaille tai ulkomailta suuntautuvaa vesiliikennettä ei huomioida.

Vesiliikenteen skenaarion energia- ja päästökehitykseen vaikuttaa niin ajantasainen kansallinen kuin EU-tason politiikka:

- Huviveneiden bensiinin ja dieselin kulutukseen kohdistuu tieliikennepolttoaineiden jakeluvelvoite (446/2007).
- Sisävesiliikenteessä käytetty polttoöljy kuuluu biopolttoöljyn jakeluvelvoitteen piiriin (418/2019). Kotimaan meriliikenteen polttoöljyssä ei lähtökohtaisesti oleteta käytettävän biopolttoöljyä.
- Meriliikenteen suuret alukset, joiden bruttotonnivetoisuus on yli 5 000, kuuluvat EU:n päästökauppajärjestelmään (ETS1) vuoden 2024 alusta alkaen (EU 2023/959). Tästä pois luetaan jäänmurtaajat.
- Meriliikenteen suuriin aluksiin (bruttotonnivetoisuus yli 5 000) kohdistuu myös Fuel EU Maritime eli alusten KHK-päästöintensiteetin sääntely (EU 2023/1805) vuoden 2025 alusta alkaen.

Kotimaan vesiliikenteen oletetaan jäävän ETS2:n ulkopuolelle. Kalastusalusten KHK-päästöjä ei huomioida.

MEERI-laskentamalliin on päivitetty uusimmat lähtötiedot vuodelle 2023 Portnetin satamassakäyntidatan ja venerekisterin tietojen perusteella. Polttoaineiden ominaisuudet on päivitetty jakeluvelvoitteen mukaisesti. Vesiliikenteen politiikkatoimien toteutus KEITO-skenaarioiden osalta on tehty TIMES-VTT-mallinnuksessa.

2.4.3 Rautatieliikenne

RAILI-malli on Suomen rautatieliikenteen käytönaikaisten päästöjen laskentamalli. Laskenta perustuu junatyyppikohtaisiin vuosisuoritteisiin, joita ovat vedetyt bruttotonnikilometrit, veturina-ajokilometrit, vaihtotyötunnit ja lähijunaliikenteen junayksikkökilometrit, sekä suoritekohtaisiin päästökertoimiin.

Päästöt lasketaan junalajeittain ja junatyypeittäin erikseen rataosille ja ratapihoille polttoöljykäyttöisille junille. Sähkökäyttöisille junille ei lasketa päästöjä, vain suora sähköenergian kulutus. Junien polttoöljyn käyttöön kohdistuu biopolttoöljyn jakeluvelvoite. Ennustekehitys perustuu Traficomien kansalliseen rautatieliikenteen ennusteeseen (Moilanen ym. 2022) sekä osin VR:n arvioon. Ennusteessa oletetaan, että suorite-ennusteen tavarajunaliikenteen kuljetettujen tonnimäärien kehitys ja matkustajajunaliikenteen henkilökilometrien kehitys vaikuttaa suoraan verrannollisesti bruttotonnikilometrien kehitykseen.

Raideliikenteeseen kohdistuu politiikkatoimenpiteenä biopolttoöljyn jakeluvelvoitteen nosto. Diesel-veturien oletetaan siis käyttävän biopolttoöljyä toisin kuin aiemmissa ennusteissa esimerkiksi PEIKKO-hankkeessa. ETS2:n ei oleteta kohdistuvan kotimaan raideliikenteeseen.

2.4.4 Lentoliikenne

Lentoliikenteen WEM- ja WAM-kehitysarviot perustuvat PEIKKO-hankkeessa määritettyyn WEM-P-perusuraan. Myös kotimaan lentoliikenne on ETS2:n piirissä

pois lukien armeijan lentokoneet, jotka eivät ole myöskään jakeluvelvoitteen piirissä.

2.4.5 Työkonesektorin kehitys

KEITO:n työkoneiden perusennuste, eli WEM-skenaario, perustuu PEIKKO-hankkeessa määritettyyn työkonesektorin WEM-P-kehitykseen.

Työkonekantaennuste on päivitetty uusimpien myyntitilastojen mukaisesti, ja työkoneiden laskenta-aikasarja ulottuu vuoteen 2060. Kantaennuste sisältää vuonna 2021 tuotetun perusennusteen mukaisen sähköistymisennusteen tietyille työkonealuokille (Markkanen & Lauhkonen 2021). Lähimpiä ennustevuosia on uudelleenarvioitu tilastototeuman perusteella KEITO-hankkeen ja Suomen liikenteen ilmanepäpuhtauksien projektiopäivitysten yhteydessä. Sähköistymistä vauhdittavan lainsäädännön puuttuessa sen oletetaan tapahtuvan markkinaehtoisesti.

Työkoneiden kannan ennustamista vaikeuttaa se, että vain pieni osa työkoneista on mukana myyntitilastoissa. Lisäksi tarkkaa tietoa niiden käytöstä ja energiankulutuksesta ei ole saatavilla. Kulutus- ja päästötiedot kansallisen KHK-inventaarion ja skenaariomallinnuksen välillä poikkeavat hieman tilastoinnin muutosten vuoksi. Tämä on huomioitu TIMES-VTT-mallinnuksessa.

Perusennusteissa polttoaineiden käyttöön tulevaisuusvuosille kohdentuu bensiiniin osalta tieliikenteen biopolttoaineiden jakeluvelvoite ja polttoöljyn osalta biopolttoaineiden jakeluvelvoite. WAM-skenaariossa on toimenpiteenä kevyen polttoöljyn bio-osuuden jakeluvelvoitteen nostaminen 30 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Jakeluvelvoite nousisi vuodesta 2026 alkaen joka vuosi tasaisesti 4,6 prosenttiyksiköllä, ollen näin 11,6 % vuonna 2026, 16,2 % vuonna 2027, 20,8 % vuonna 2028, 25,4 % vuonna 2029 ja 30 % vuonna 2030. Tämä vähentää päästöjä toiminnassa, jossa käytetään kevyttä polttoöljyä.

Vuodesta 2028 lähtien työkoneiden polttoaineiden jakelu kuuluu myös ETS2:n piiriin, lukuun ottamatta maa- ja metsätalouden työkoneita, jotka jäävät ETS2-sääntelyn ulkopuolelle. ETS2-vaikutusta ei ole käsitelty TYKO-mallissa, vaan ETS2-hintavaikutus on huomioitu TIMES-VTT-mallinnuksessa.

Kaivostoiminnan työkoneet

PEIKKO-hankkeen skenaariomallinnuksessa kaivostoiminnan työkoneet käsiteltiin osana TYKO- ja TIMES-VTT-mallinnusta. KEITO-hankkeessa oli mahdollisuus tarkastella tarkemmin kaivosten työkonekannan sähköistymistä, jota tutkittiin käymällä läpi kaivostoiminnan sähköistymiseen liittyviä julkaisuja, lupadokumentteja sekä sähköistymiseen liittyvää uutisointia ja yritysten tiedotusta. Yleisesti ottaen mallinnusta suoraan hyödyttävää tietoa on saatavilla vähän.

Työkoneet muodostavat keskeisen osan niin avolouhosten kuin maanalaisen kaivostoiminnan tuotantoa, ja suuri osa niistä on urakoitsijoiden omistuksessa tai käytössä. Kalustoon kuuluvat muun muassa porauslaitteet, kiviautot, kaivinkoneet, lastauskoneet ja pyöräkuormaajat. Käytössä on sekä diesel- että sähkökäyttöisiä

koneita, mutta valtaosa kalustosta toimii edelleen fossiilisilla polttoaineilla. Kaivoskohtaisesti käytössä olevien koneiden määrä vaihtelee kymmenistä jopa satoihin. Suomessa on arviolta useita satoja kaivostoimintaan käytettäviä raskaita koneita, ja niiden kunnossapito sekä käyttö työllistävät merkittävästi myös aliurakoitsijoita. Kaluston tekninen taso on korkealla, mutta suurin osa koneista on edelleen miehitettyjä ja vaatii kuljettajaa. Automaatio ja sähköistyminen ovat läsnä lähinnä yksittäisissä koneissa ja kokeiluissa, mutta eivät vielä hallitse toimintaa.

Päästövähennystavoitteita on monilla kaivosalan yhtiöistä, mutta tiedot koskevat myös lämmityssähkön käyttöä tai biopolttoaineita. Kemin kaivos on siirtymässä kokonaan biopolttoaineisiin vuonna 2025. Kittilässä kultakaivoksella on ollut kokeiluja menossa sähkökäyttöisestä porauskalustosta, mutta kalusto ei ole vielä käytössä.

Tällä hetkellä Bolidenin omistamalla Kevitsan ja Terrafamen Talvivaaran kaivoksilla on käytössä osin sähköisiä työkoneita, hybridejä (lastauskoneita ja kiviautoja). Kevitsassa otettiin Euroopan suurin sähköllä toimiva lastauskone käyttöön jo vuonna 2013. Valmistelussa olevien kaivosten suunnitelmissa on kuitenkin nähtävissä trendiä, esim. Anglo American valmistelussa oleva Sakatin hanke, jolla myös EU:n komission myöntämä strategisen hankkeen status. Lisäksi teknologiateollisuuden vähähiilitiekarttojen mukaan kaivoksilla tavoitellaan työkoneiden täyssähköistymistä viimeistään vuoteen 2040 mennessä. Tiekarttaan liittyvissä skenaariolaskelmissa on käytetty suhdetta diesel/sähkö 2,2:1.

Sähkön käyttö näyttää tilastokeskuksen mukaan olevan kasvussa kaivosteollisuudessa ja öljyn vähenemässä (Taulukko 2). Sähkön käytön lisääntyminen ei kuitenkaan ole korrelaatiota pelkästään siitä, että öljykäyttöisiä koneita olisi vähennetty, vaan muutos johtunee monista tekijöistä, kuten lämmityksen ja/tai rikastamojen energiakäytön muutoksesta. Kaivosten toiminnassa on ollut myös muutoksia tällä ajanjaksolla, kuten useiden kaivosalueiden laajennuksia, maanalaisten kaivosten syventyminen ja tuotannollisia muutoksia.

Taulukko 2. Mineraalien kaivu -toimialojen energiankäytön kehitys 2010–2023 (Tilastokeskus 2025).

05-09 B Mineraalien kaivu														
Energiankäyttö (TJ)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Öljy	3019	4538	4610	4513	3910	3583	1507	1336	723	1071	1071	1085	1281	1494
Hiili	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Maakaasu	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	125	.	.	.
Turve	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Puupolttoaineet	.	0	30	32	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Muut energialähteet	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	41
Sähkö	3263	3869	4732	4582	4462	4500	4947	5186	5206	5111	5535	5831	5895	5567
Lämpö	251	193	330	116	105	74	92	170	120	291	242	387	417	447
Kaikki energialähteet yhteensä	6533	8616	9721	9269	8516	8208	6598	6748	6121	6562	7082	7449	7778	7707

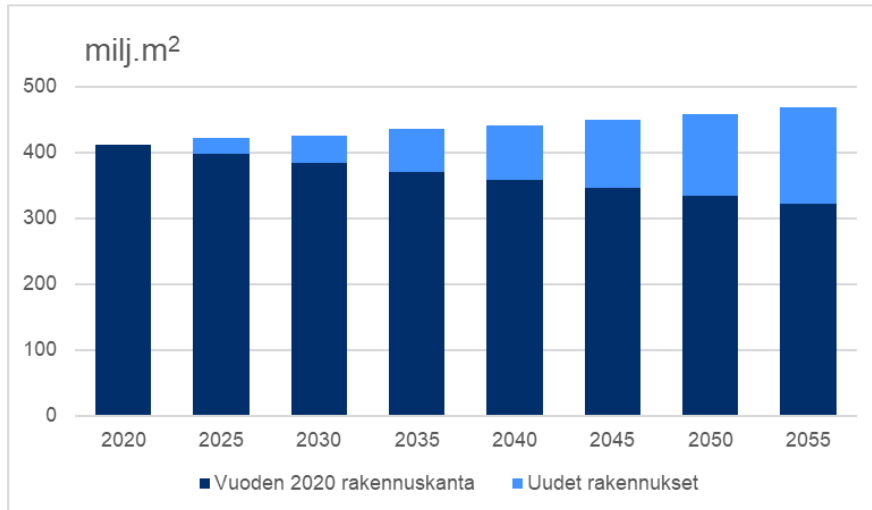
Esimerkiksi maanalainen Kemin kromikaivos toteutti vuosina 2017–2023 laajennuksen, jossa kaivosta syvennettiin 500 metristä 1000 metriin. Samalla uusittiin kaivoksen malmikäsittely- ja nostojärjestelmä sekä säädettiin louhintamenetelmiä ja rikastamon prosesseja. Terrafamen avolouhoksella

investoitiin uraanintalteenottolaitoksen ylösajoon vuosina 2022–2024 sekä hybridikiviautoihin. Kittilän maanalaisella kultakaivoksella siirryttiin kaukolämpöön vuonna 2014, investoitiin kaivoksen syventämiseen vuosina 2017–2019, kaivoskuilun rakentamiseen ja rikastamon kapasiteetin kasvattamiseen vuosina 2018–2020 sekä sähköllä operoivaan malmihissiin. Kevitsan nikkeli-kupari-avolouhoksen rikastamon tuotantoa laajennettiin vuonna 2019 ja neljäs jauhinmylly otettiin käyttöön vuonna 2020.

Sähkö on saapunut kaivoksille hitaasti muiden investointien ohessa. Tavallista on esimerkiksi maanalaisten kaivosten kohdalla, että malminkuljetus syvemmältä muuttuu erilaisten nostotekniikoiden myötä ja dieselautojen käyttö vähenee, kun malminkuljetus maanpinnalle ainakin osittain automatisoituu ja sähköistyy. Lisäksi useimmat koneet (esim. pyöräkuormaajat, porauskalusto, kaivinkoneet, traktorit jne.) ovat erilaisten aliurakoitsijoiden omistuksessa. Urakoitsijoita voi yhdellä kaivoksella olla useita kymmeniä. Yleisesti sanoen, paljon liikkuvia pieniä ja keskisuuria koneita, joita on määrällisesti paljon hyvin erilaisissa tehtävissä, on vaikeinta ja hitainta sähköistää. Sen sijaan kaivosyhtiön omassa omistuksessa ja kokonaisuudessaan täysin kaivosyhtiön hallinnoimia suurikokoisia, vähän liikkuvia tai paikallaan pysyviä kokonaisuuksia (hissit, myllyt, kiviautot) on helpompaa ja tehokkaampaa siirtää sähköverkkoon. Etäohjaus ja automaatio ovat kuitenkin tekemässä tuloa kaivoksille ja esimerkiksi Kittilän kaivoksella on etäohjauksen jo mahdollistava 5G-verkko.

2.4.6 Rakennuskannan ja rakentamisen kehitys

Rakennuskannan kehityksen lähtökohtana on vuoteen 2020 mennessä valmistunut rakennuskanta. Se muodostuu omakotitaloista (155 milj. m²), rivi- ja kerrostaloista (135 milj. m²), palvelurakennuksista (100 milj. m²) ja vapaa-ajan asuinrakennuksista (25 milj. m²). Vuoden 2020 rakennuskannasta (415 milj. m²) on vuonna 2055 jäljellä noin 70 prosenttia. Uudisrakentaminen korvaa poistumaa ja kasvattaa rakennuskantaa noin viidellä prosentilla, niin että vuonna 2055 rakennuskannan kerrosala on 470 m² (kuva 6). Uusien rakennusten osuus tulevasta vuoden 2055 rakennuskannasta on noin 30 prosenttia. Rakennuskannan ja uudisrakentamisen määrälliset ennusteet ovat samat WEM- ja WAM-skenaarioissa.



Kuva 6. Vuoden 2020 rakennuskannasta (415 milj. m²) on jäljellä vuonna 2055 noin 70 %. Yhteensä vuoden 2050 rakennuskanta on 470 milj. m².

Rakennuskanta

Rakennusten ja uudisrakentamisen osalta Green Deal ja FitFor55-tavoitteisiin pyritään energiatehokkuustavoitteiden tiukennuksilla. Aiemman lähes nollaenergiatavoitteen sijaan vuoteen 2050 mennessä rakennuskannan tulisi olla päästötön. Ohjeellinen osatavoite tulee EU:n uusiutuvan energian direktiivistä (RED), jonka mukaan uusiutuvan energian osuuden rakennusten lämmittämiseen käytettävästä energiasta tulisi olla vuonna 2030 on vähintään 49 prosenttia (EU 2024/2413). WEM ja WAM skenaarioissa ovat oletuksena korjausrakentamisen strategiaan kirjatut Suomen omat linjaukset fossiilisista energialähteistä luopumisesta kiinteistökohteisessa lämmityksessä (Ympäristöministeriö, 2020).

Uutena vaatimuksena Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) 9(1) artikla tuo ei-asuinrakennuksille vähimmäisenergiatehokkuusvaatimukset (EU 2024/1275). Vaatimukset koskevat vuodesta 2030 lähtien rakennuksia, jotka kuuluvat energiatehokkuudeltaan heikoimman 16 prosentin joukkoon. Vuodesta 2033 eteenpäin vaatimus laajenee koskemaan energiatehokkuudeltaan heikointa 26 prosenttia. Direktiivin mukaan kynnysarvot asetetaan vuoden 2020 rakennuskannan primaarienergiankulutuksen perusteella. Suomessa primaarienergiankulutusta vastaa energiamuotokertoimella painotettu energiankulutus (e-luku).

EPBD 10 artikla asettaa olemassa oleville julkisille rakennuksille vaatimuksen aurinkoenergian asentamisesta. Vaatimus koskee ensimmäisessä vaiheessa 31.12.2027 lähtien hyötypinta-alaltaan suurempia kuin 2000 m² julkisia rakennuksia. 31.12.2028 vaatimuksen piiriin tulevat 750 m² suuremmat rakennukset ja 31.12.2030 myös 250 m² suuremmat rakennukset. WAM-

skenaariossa tämä vaatimus on huomioitu kasvattamalla aurinkosähkön pientuotannon määrää.

Julkisten elinten ei-asuinrakennuskantaa koskee myös Energiatehokkuusdirektiivin (EED) 6 artikla, joka velvoittaa parantamaan vähintään 3 prosenttia sellaisten rakennusten hyötypinta-alasta, jotka eivät ole lähes nollaenergiarakennuksia vuoden 2024 alussa (EU 2023/1791). Hyötypinta-alaan lasketaan 250 m² suuremmat rakennukset. Julkisia elimiä ovat valtion, hyvinvointialueiden, kuntayhtymien ja kuntien viranomaiset. Tämä vaatimus on ollut voimassa jo aiemmin mutta kohdistunut rajatumpaan rakennuskantaan. WEM- ja WAM-skenaarioissa tämä vaatimus on sisällä olemassa olevan rakennuskannan energianominaiskulutuksessa kuitenkin niin, että vaikutus WAM-skenaariossa jonkin verran WEM-skenaariota suurempi.

Asuinrakennuskantaa koskee EPBD 9(2) artiklan kollektiivinen vaatimus pienentää primaarienergiankulutuksen keskiarvoa (Suomessa e-luvun keskiarvoa) 16 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja 26 prosenttia vuoteen 2035 mennessä. Lähtötaso määritetään vuoden 2020 energiatehokkuuden tilan perusteella. WEM- ja WAM-skenaarioissa tämä vaatimus on sama ja sisällä olemassa olevan rakennuskannan energianominaiskulutuksessa.

Korjausrakentaminen

Suomen luvanvaraisen korjausrakentamisen energiatehokkuusvaatimukset on annettu ympäristöministeriön asetuksella (Ympäristöministeriö 4/2013). Rakennusosakohtaiset vaatimukset tähtäävät lämpöhäviöiden puolittamiseen tai uudisrakentamisen tasoiseen lopputulokseen. Lähivuosien ja pitkän aikavälin tavoitteen saavuttamiseksi vaatimukset tiukennetaan nykyisten korjausrakentamisen vaatimusten kustannusoptimaaliselle tasolle. WEM- ja WAM-skenaarioissa tämä vaatimus on sisällä olemassa olevan rakennuskannan energianominaiskulutuksessa.

EPBD 10 artikla tuo 31.12.2027 hyötypinta-alaltaan suurempien kuin 500 m² ei-asuinrakennusten luvanvaraisiin korjauksiin uudeksi vaatimukseksi aurinkoenergian käyttöönoton. Vaatimus koskee hankkeita, joissa tehdään perusparannus tai kattoon kohdistuvia toimenpiteitä tai teknisten järjestelmien asennuksia. WAM-skenaariossa tämä vaatimus on huomioitu kasvattamalla aurinkosähkön pientuotannon määrää.

Uudisrakentaminen

Toistaiseksi voimassa ovat uudisrakentamisen lähes nollaenergiavaatimukset (Ympäristöministeriö 1010/2017). EPBD 7 artiklan mukaan uusien julkisten rakennusten on oltava vuodesta 2028 lähtien päästöttömiä. Vuodesta 2030 lähtien vaatimus laajentuu koskemaan kaikkia uusia rakennuksia. Päästöttömän rakennuksen energiankulutuksen tulee olla vähintään 10 prosenttia pienempi kuin lähes nollaenergiarakennusten kulutuksen. Direktiivin mukaan päästötön rakennus ei saa aiheuttaa fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöjä paikan päällä.

WAM-skenaarioissa tämä on otettu huomioon pienentämällä uudisrakennusten energianominaiskulutusta.

EPBD 10 artiklan mukaan vuoden 2026 jälkeen kaikkiin hyötypinta-alaltaan 250 m² suurempiin ei-asuinrakennuksiin on asennettava aurinkoenergian tuotantoa. Vuoden 2029 jälkeen velvoite laajenee koskemaan kaikkia uusia asuinrakennuksia ja rakennusten yhteydessä olevia uusia katettuja pysäköintialueita. WAM-skenaariossa tämä vaatimus on huomioitu kasvattamalla aurinkosähkön pientuotannon määrää.

Erillislämmityksen päästökehitys

Päästökauppasektorin eli kauko- ja sähkölämmityksen osuus asuinrakennusten ja palvelurakennusten lämmityksestä lähes kaksi kolmannesta ja taakanjakosektorin, eli rakennusten erillislämmityksen on yksi kolmasosa. Erillislämmityksen pääasialliset energialähteet ovat puu ja biomassa sekä kevytpolttoöljy.

WEM-skenaariossa vuoteen 2040 mennessä vuoteen 2005 mennessä valmistuneen rakennuskannan ja sen jälkeen rakennettujen uusien rakennusten päästöt ovat hiukan yli 8 prosenttia vuoden 2005 päästöistä. WAM-skenaariossa päästöt ovat enää vajaa 8 prosenttia vuoden 2005 päästöistä (taulukko 3).

WEM- ja WAM-skenaarioiden välinen ero on marginaalinen ja johtuu siitä, että molemmissa skenaariossa luovutaan samaan tahtiin öljylämmityksestä. Uudisrakentamisen kiristyneet vaatimukset vaikuttavat hitaasti koko rakennuskannan energiatehokkuuteen ja olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuutta parannetaan edelleenkin pääosin vain osana tavanomaisia korjaushankkeita.

Suurin osa uusista ja kiristyneistä energiatehokkuusvaatimuksista (taulukko 4) tulee näkymään päästökauppasektorille kohdistuvassa lämmitysenergian ja sähkönkysynnässä.

Taulukko 3. Rakennuskannan päästökehitys WEM- ja WAM-skenaarioissa (milj.tonnia CO₂-ekv.).

WEM – Sektorit	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Rakennusten lämmitys	4.07	3.72	2.56	2.16	1.46	0.73	0.49	0.33
WAM – Sektorit	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Rakennusten lämmitys	4.07	3.72	2.56	2.16	1.47	0.74	0.48	0.32

Taulukko 4. Yhteenveto rakennuksia koskevien energiatehokkuusvaatimusten voimaantulon aikatauluista.

Olemassa olevat rakennukset ja luvanvarainen korjausrakentaminen		Uudet rakennukset
EPBD perusvuosi	2020	EPBD perusvuosi
	2021	
	2022	
	2023	
EED perusvuosi	2024	EED perusvuosi
	2025	
Julkisten elinten laajennettu 3 % perusparannusvelvoite	2026	
	2027	Aurinkoenergian tuotantovalmius asennettava ei-asuinrakennuksiin, joiden hyötypinta-ala >250 m ²
Aurinkoenergia asennettava julkisiin rakennuksiin, joiden hyötypinta-ala >2000 m ²	2028	Julkisten elinten uusien rakennusten oltava päästöttömiä
Ei-asuinrakennuksiin pinta-alaltaan >500 m ² luvanvaraisten korjausten yhteydessä		
Aurinkoenergian tuotantoa asennettava julkisiin rakennuksiin, joiden hyötypinta-ala >750 m ²	2029	
Ei-asuinrakennusten vähimmäisenergiatehokkuuden 16 % kynnys	2030	Kaikkien uusien rakennusten oltava päästöttömiä
Asuinrakennuskannan energiatehokkuuden keskiarvo -16 % vuodesta 2020		Aurinkoenergiantuotanto velvoite uusille asuinrakennuksille ja rakennusten yhteydessä sijaitseville katetuille pysäköintialueille
Aurinkoenergia asennettava julkisiin rakennuksiin, joiden hyötypinta-ala >250 m ²	2031	
	2032	
Ei-asuinrakennusten vähimmäisenergiatehokkuuden 26 % kynnys	2033	
	2034	
Asuinrakennuskannan energiatehokkuuden keskiarvo -26 % vuodesta 2020	2035	

2.4.7 Maatalouden kehitys

Maatalouden kehitys perustuu PEIKKO-raportin WEM-P-skenaarioon (Koljonen ym. 2024). WAM-skenaariossa maatalouden pellonkäyttö ja eläinmäärät ovat muuten samat kuin WEM-skenaariossa, mutta emolehmien, hiehojen ja sonnien osuudet arvioitiin uudelleen olettaen lihantuotannon tehostuvan lypsykarjassa.

Suurin osa kotimaisesta naudanlihasta tulee maitotiloilta, joilla syntyvät sonnivasikat hyödynnetään tehokkaasti lihantuotantoon. Lihantuotannon tehokkuutta voidaan kuitenkin edelleen parantaa siementämällä lypsylehmät liharotuisen sonnien siemenellä aina, kun uudistushiehojen tuottamiseen ei ole tarvetta. Liharotuiset vasikat painavat keskimäärin 11 % enemmän kuin maitorotuiset vastineensa, ja saavuttavat suuremman lopullisen koon käytännössä samalla rehumäärällä. Viking Geneticsin ja Martikaisen (2018) mukaan liharotusiemennysten potentiaalinen saavutettava osuus kaikista lypsylehmien siemennyksistä on 66–70 %, mutta lehmien kestävyys ja eliniän pidentyessä osuus voi kasvaa vielä korkeammaksi. WAM-skenaariossa oletettiin, että liharotusteymien osuus nousee nykyisestä 31 %:sta 80 %:iin vuoteen 2055 mennessä. Samalla kaikki uudistushiehot tuotetaan x-lajitellulla siemenellä ja puolet liharotusteymäsiemennyksistä y-lajitellulla siemenellä. Näiden muutosten myötä sonnien määrä kasvaa WAM-skenaariossa 20 %, ja emolehmien ja hiehojen määrä vähenee 21 % verrattuna WEM-skenaarioon vuoteen 2055 mennessä.

Lehmien metaanipäästöt tuotettua maitokiloa kohti ovat vähentyneet selvästi vuosien 1960–2020 aikana (Huhtanen ym. 2022). Tämä johtuu karjan paremmasta tuottavuudesta sekä kehittyneestä ruokinnasta ja jalostuksesta, joiden ansiosta päästöjä syntyy vähemmän suhteessa tuotettuun maitomäärään. Suotuisa kehitys jatkuu havaitun trendin mukaisesti WEM-skenaariossa. Rehunsäästöindeksin käyttöönotto jalostusarvioissa voi kuitenkin edelleen parantaa rehun hyötysuhdetta ja vähentää lehmien metaanipäästöjä. Lidauer ja Pösön (2020) seminaariesityksen arvioissa jalostuksen avulla voitaisiin saavuttaa jopa 6 % lisäparannus rehunkäytön tehokkuuteen, mutta se edellyttää merkittäviä investointeja lehmien rehunkulutuksen mittaamiseen. WAM-skenaariossa jalostuksen tehostumisen odotetaan tuovan 2–5 % lisäparannuksen lypsylehmien rehunkäyttökyvyssä WEM-skenaarioon verrattuna (5 % lisäparannus saavutetaan vuoteen 2050 mennessä). Lisäksi WAM-skenaariossa oletettiin, että 3NOP-rehulisäainetta¹⁰ aletaan syöttämään kaikille tällä hetkellä sallituille nautaryhmille (lypsylehmät ja maidontuotantoon kasvatettavat yli 17 kk hiehot) vuodesta 2027 eteenpäin.

WEM-skenaariossa maatalouden biokaasutuotanto vastaa PEIKKO-WEM-P-skenaariota (Koljonen ym. 2024), kun taas WAM-skenaariossa

¹⁰ 3NOP (3-nitro-oksipropanol) on rehulisäaine, joka vähentää nautojen pötsikäymisessä syntyvää metaania estämällä metaanintuotannossa keskeisen entsyymin toimintaa ilman vaikutusta eläimen tuotantoon tai hyvinvointiin. IRMA-hankkeen mukaan päästöt vähenevät noin 10 % erillisruokinnassa ja 25 % seosruokinnassa.
<https://www.luke.fi/projektit/irma>

biokaasutuotannon kehitys pohjautuu MTK:n päivitetyn ilmastotiekartan WAM1-skenaarioon (Lehtonen ym. 2024a). Syötteinä maatalouden biokaasutuotannossa käytetään kotieläinten lantaa sekä kestävyyskriteerit täyttävää ylijäämänurmisoa. Biokaasutuotanto lisääntyy merkittävästi molemmissa skenaarioissa. Vuoteen 2050 mennessä tuotanto on yli seitsemänkertainen WEM-skenaariossa ja yli kahdeksankertainen WAM-skenaariossa verrattuna vuoden 2020 lähtötasoon.

KEITO-skenaarioiden kasvihuonekaasupäästöjen laskenta on päivitetty vastaamaan vuoden 2025 inventaariolähetystä, jossa maatalousmaiden ja lannankäsittelyn päästöjen laskennassa otettiin käyttöön IPCC:n vuoden 2019 täsmennys (IPCC 2019). Tämän muutoksen vuoksi WEM-skenaariion päästökehitys poikkeaa PEIKKO-raportin WEM-P-skenaariosta, vaikka taustalla oleva kehityskulku on sama.

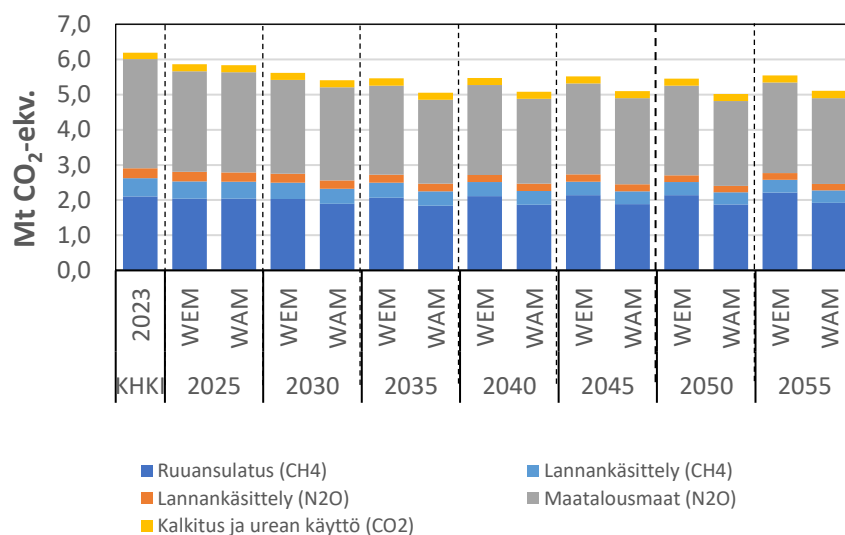
Maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen kehitys

Maataloussektorin päästöt vähenevät nykytasosta sekä WEM- että WAM-skenaariossa vuoteen 2035 saakka, mikä johtuu erityisesti nautojen ja sikojen määrän vähentymisestä sekä turvepeltojen nurmi- ja kosteikkoviljelyn lisääntymisestä (Taulukko 5, Kuva 7). Päästöihin vaikuttavat myös täsmäviljelyn yleistymisen, biokaasutuotantoon ohjautuvan lannan määrän kasvu ja kierrätyslannoitteiden käytön lisääntyminen.

WAM-skenaariossa päästövähennykset ovat WEM-skenaariota suurempia, mikä johtuu mm. nautojen 3NOP-lisäaineruokinnasta ja lypsylehmien rehunkäytön tehostumisesta jalostuksen seurauksena. Nettopäästöt vuonna 2035 ovat WEM-skenaariossa 5,5 Mt CO₂-ekv. ja WAM-skenaariossa 5,1 Mt CO₂-ekv., minkä jälkeen päästöt pysyvät molemmissa skenaarioissa lähellä vuoden 2035 tasoa aina vuoteen 2055 saakka. Päästövähennyskehityksen tasaantuminen vuoden 2035 jälkeen liittyy erityisesti maidontuotannon elpymiseen. Taloudellisen mallinnuksen mukaan maidontuotanto kääntyy viime vuosien lievältä lasku-uralta maidontuotannon hitaaseen palautumiseen vuoteen 2040 mennessä ja pieneen nousuun vuoteen 2055 mennessä. Samalla nautojen kokonaismäärän lasku hidastuu. Tähän myötävaikuttavat WEM- ja WAM-skenaarioissa oletetut EU-tason maitotuotteiden hinnat (OECD-FAO Agricultural Outlook 2023), lypsykarjatilojen rakennekehitys, lypsylehmien keskituotoksen kasvu ja osin peltoalan saatavuus. Maidontuotannon ja sitä kautta maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöjen kehitykseen liittyy epävarmuutta edellä mainittujen tekijöiden vuoksi.

Taulukko 5. Maataloussektorin päästöt päästöluokittain KEITO-WEM- ja -WAM-skenaarioissa. Vuosi 2023 vastaa KHK-inventaarion arvoja (Tilastokeskus 2025a).

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
WEM								
Ruuansulatus (CH ₄)	2,11	2,04	2,03	2,07	2,11	2,14	2,14	2,21
Lannankäsittely (CH ₄)	0,52	0,50	0,46	0,43	0,40	0,39	0,37	0,37
Lannankäsittely (N ₂ O)	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,19
Maatalousmaat (N ₂ O)	3,10	2,85	2,67	2,53	2,55	2,59	2,54	2,58
Kalkitus ja urean käyttö (CO ₂)	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Yhteensä	6,20	5,86	5,62	5,46	5,47	5,52	5,45	5,54
WAM								
Ruuansulatus (CH ₄)	2,11	2,04	1,90	1,84	1,87	1,88	1,87	1,92
Lannankäsittely (CH ₄)	0,52	0,48	0,43	0,40	0,39	0,37	0,35	0,36
Lannankäsittely (N ₂ O)	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19
Maatalousmaat (N ₂ O)	3,10	2,85	2,65	2,39	2,41	2,45	2,41	2,44
Kalkitus ja urean käyttö (CO ₂)	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Yhteensä	6,20	5,83	5,41	5,06	5,08	5,10	5,01	5,10



Kuva 7. Maatalouden päästöt WEM- ja WAM-skenaarioissa päästöluokittain. Vuosi 2023 vastaa KHK-inventaarion arvoja (Tilastokeskus 2025a).

Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman mukaiset (kts. luku 2.5, Taulukko 8. Maankäyttösektorin toimenpiteet WEM- ja WAM-skenaarioissa. Taulukossa esitetään vain ne WAM-skenaarioiden toimenpiteet, jotka poikkeavat WEM-skenaariosta. Ellei toisin mainita, toimenpiteiden oletetaan toteutuvan vuosina 2023–2055. Turvepeltoihin kohdistuvat toimenpiteet vähentävät maataloussektorin päästöjä WEM-skenaariossa 0,05 Mt CO₂-ekv. vuonna 2025, 0,16 Mt CO₂-ekv. vuonna 2030 ja 0,29 Mt CO₂-ekv. vuosina 2035–2055. WAM-skenaariossa, jossa vettämisen ja kosteikkoviljelyn pinta-alat ovat osittain laajemmat, päästövähennys on suurempi ja on 0,38 Mt CO₂-ekv. vuosina 2035–2055. Lantabiokaasun tuotanto vähentää lannankäsittelyn päästöjä sitä enemmän mitä suurempi osa lannasta hyödynnetään biokaasutuotantoon (Taulukko 6), mutta päästöjen vähenemään vaikuttaa myös se, millaisesta lantajärjestelmästä lantaa biokaasutuotantoon ohjautuu. Lypsykarjarotuisten nautojen kokonaismäärä vähenee lypsylehmien lukumäärän vähentyessä, mikä antaa naudanlihamarkkinoille tilaa emolehmäpohjaisen naudanlihan tuotannon hitaalle kasvulle. Emolehmät ovat kuitenkin usein kestävämpipohjaisissa järjestelmissä, jossa lannan metaanipäästöt ovat suuremmat kuin lietelantajärjestelmissä, jonka pumpattavassa muodossa oleva lanta on helpommin käytettävissä biokaasun tuotantoon. Koska emolehmien, hiehojen ja sonnioiden määrät ovat hieman erilaiset WEM- ja WAM-skenaarioissa, ei biokaasulannan tuottama päästövähennys ole täysin samansuuruinen, vaikka biokaasulannan osuus olisi molemmissa skenaarioissa sama. Muiden maatalouden toimien tuottamat päästövähennykset on esitetty Taulukko 7.

Taulukko 6. Biokaasutuotantoon ohjautuvan lannan osuus (%) ja lannankäsittelyn päästöjen vähenemä (Mt CO₂-ekv.) WEM- ja WAM-skenaarioissa tarkasteluvuosittain.

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
WEM % osuus	2	9	19	29	32	35	38
<i>päästövähennys</i>	-0,01	-0,06	-0,12	-0,18	-0,20	-0,21	-0,24
WAM % osuus	7	17	23	29	34	38	38
<i>päästövähennys</i>	-0,04	-0,10	-0,14	-0,17	-0,20	-0,23	-0,23

Taulukko 7. Arvioidut päästövähennykset (Mt CO₂-ekv.) väkilannoitteiden käyttöä ja nautojen ruuansulatuksen metaanipäästöjä vähentävissä maatalouden toiminna vuosina 2025–2055.

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Kierrätyslannoitteet ¹							
WEM	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,04
WAM	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05
Täsmäviljely ²							
WEM	-0,03	-0,07	-0,11	-0,14	-0,15	-0,15	-0,15
WAM	-0,03	-0,07	-0,11	-0,14	-0,15	-0,15	-0,15
Lypsylehmien rehunkäyttökyky							
WAM	0	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05
3NOP-lisäaineluokinta ⁴							
WAM	0	-0,11	-0,19	-0,19	-0,19	-0,18	-0,19

1) vähentävät väkilannoitteiden käyttöä 3–8 % 2025–2055

2) vähentää typen tarvetta -5 % vuoteen 2030 ja -10 vuoteen 2040 mennessä (Kaisun tavoite)

3) syötetään lypsylehmille ja maidontuotantoon kasvatettaville yli 17 kk ikäisille hiehoille

2.4.8 Jätesektorin kehitys

Jätesektorin päästöt koostuvat kaatopaikkasijoituksista, jätevesistä, biologisesta käsittelystä sekä päästökauppasektorin ulkopuolisesta jätteenpoltosta aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä. Biologinen käsittely pitää sisällään jätteiden kompostoinnin ja mädätyksen. Suurin osa sektorin päästöistä tulee kaatopaikoilta, tosin kaatopaikkapäästöjen määrä on tasaisesti vähentynyt jo vuosikautia.

Vuonna 2022 jätesektorin kokonaispäästöt olivat Suomessa 2,5 Mt CO₂-ekv. Tämä lukema pitää sisällään ETS1-päästökauppasektorin ulkopuolisten jätteenpolttolaitosten päästöt, jotka kasvihuonekaasuinventaariossa raportoidaan jätteiden sijaan energiasektorin alla (Tilastokeskus 2025d). Jätesektorin suurin päästölähde ovat historiallisesti olleet kaatopaikkakaasut, jotka vuonna 2022 muodostivat 55 % jätteiden aiheuttamista päästöistä. Kaatopaikkapäästöt ovat kuitenkin vähentyneet vuosi vuodelta, sillä kaatopaikalle päätyvän jätteen määrä ja koostumus ovat muuttuneet. Vuodesta 2016 eteenpäin sovelletun kaatopaikoille päätyvän biohajoavan materiaalin määrää rajoittavan asetuksen johdosta tämän vähenevän trendin odotetaan jatkuvan. Tämän seurauksena tulevaisuudessa jätteenpolttolaitosten nousee oletettavasti jätesektorin suurimmaksi päästölähteeksi. Jätevesistä ja biologisesta käsittelystä aiheutuvat päästöt olivat vuonna 2022 yhteensä 14 % jätesektorin päästöistä, ja ainoastaan mädätyksen osalta päästöjen trendi on ollut lähivuosina kasvava. Mädätyksen päästöt vuonna 2022 olivat kuitenkin vain 0,6 % jätesektorin kokonaispäästöistä.

Jätesektorin kokonaispäästöt ovat vähentyneet jo vuosia edellä esitetyistä syistä, eikä trendin odoteta muuttuvan. Vuoteen 2030 mennessä sektorin päästöt vähenevät tehdyn WEM-skenaarion mukaan 2,1 Mt CO₂-ekv.:iin, ja edelleen vuoteen 2050 mennessä 1,5 Mt CO₂-ekv.:iin. Jätevedenkäsittelyn päästöt vähenevät WEM-skenaariossa myös väestömäärän kasvaessa, sillä laitospäästön osuuden oletetaan kasvavan. Biologisen käsittelyn osalta mädätyksen osuuden oletetaan yhä kasvavan kiinteän yhdyskuntaperäisen laitospäästön kompostoinnin määrän vähentyessä. Kasvu on kuitenkin hyvin maltillista: vuoden 2022 mädätyspäästöt 0,015 Mt CO₂-ekv. kasvavat skenaariossa vuoteen 2050 mennessä 0,017 Mt CO₂-ekv.:iin. Jätteenpolton päästöt mukailevat väestöennusteen kehitystä, kasvaen vuoden 2022 lukemasta 0,80 Mt CO₂-ekv. vuoteen 2030 mennessä 0,81 Mt CO₂-ekv.:iin ja päätyen väkilukuennusteen muuttuessa väheneväksi lopulta vuonna 2050 arvoon 0,80 Mt CO₂-ekv.

Jätesektorin WAM-skenaario noudattaa WEM-skenaarion mukaista kehitystä. Tässä kannattaa kuitenkin huomata, että WAM-skenaarion oletukset liittyen hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin jätteenpolton yhteydessä kohdistuivat vain yhteen suureen kokoluokan laitokseen, jonka päästöt luokitellaan energiatuotannon päästöihin.

2.4.9 F-kaasujen kehitys

F-kaasuja (HFC- ja PFC-yhdisteet, rikkiheksafluoridi SF₆ ja typpitrifluoridi NF₃) käytetään pääosin kylmä- ja ilmastointilaitteissa, lämpöpumpuissa, sähköisissä kytkinlaitteistoissa, palontorjunnassa, solumuovien valmistuksessa sekä aerosoleina ja liuottimina. Vuonna 2023 F-kaasujen kokonaispäästöt olivat hieman reilut 0,7 Mt CO₂-ekv. F-kaasujen käyttö ja päästöt kasvoivat voimakkaasti 1990-luvun alusta alkaen, jolloin niillä korvattiin otsonikerrosta tuhoavia CFC- ja HCFC-aineita monissa sovelluksissa. F-kaasupäästöt olivat korkeimmillaan Suomessa

vuonna 2008, jolloin päästöt olivat vajaat 1,4 Mt CO₂-ekv. EU-tason sääntelyä F-kaasuille on ollut olemassa 2000-luvun puolivälistä saakka ja sen avulla päästöjen kasvu saatiin taittumaan. Viimeiset kymmenen vuotta F-kaasupäästöt ovat olleet Suomessa laskussa.

F-kaasuille mallinnettiin WEM-perusskenaario, jossa F-kaasuihin kohdistuva EU-sääntely tarkoittaa EU:n F-kaasuasetusta (517/2014¹¹) sekä moottoriajoneuvojen ilmastointijärjestelmien päästöistä annettua direktiiviä (nk. MAC-direktiivi 2006/40/EC¹²). F-kaasuasetuksen keskeisimmät keinot päästöjen vähentämisessä ovat lukuisat sektorikohtaiset käyttörajoitukset ja kiellot, pätevyysvaatimukset F-kaasujen käsittelylle, laitteiden vuototarkastukset sekä HFC-yhdisteiden markkinoille saattamisen asteittain kiristynvä määrällinen rajoittaminen. Lukuisia käyttörajoituksia ja kieltoja on jo astunut voimaan ja joitakin astuu voimaan vielä 2020-luvun aikana. EU:ssa markkinoille saatettava sallittu HFC-yhdisteiden määrä vähenee merkittävästi 2020-luvun aikana. Joissakin merkittävässä päästölähteissä F-kaasut on jo korvattu kokonaan vaihtoehtoisilla aineilla uusissa laitteissa. F-kaasujen suurimmassa yksittäisessä päästölähteessä, kaupan suurissa kylmälaitoksissa, hiilidioksidi sekä pienemmässä määrin propaani ovat jo korvanneet korkean GWP-arvon¹³ HFC-kylmäaineet uusissa laitteissa. Myös ajoneuvojen ilmastointilaitteiden kohdalla HFC-kylmäaineet on korvattu matalan GWP-arvon kylmäaineella uusien henkilö- ja pienten pakettiautojen ilmastointilaitteissa. Suurimmassa osassa F-kaasujen päästölähteistä HFC-kaasujen käyttö joko loppuu kokonaan tai vähenee merkittävästi perusskenaariossa. Ainoaksi merkittäväksi HFC-kaasujen päästölähteeksi perusskenaariossa jäävät lämpöpumput. Lisäksi esimerkiksi julkisen sektorin hankinnoissa pyritään välttämään F-kaasuja sisältäviä laitteita. Ohjauskeinona toimii julkisille hankinnoille laaditut kriteerit HFC-yhdisteiden vaihtoehtoista. Kriteerien viestintä ja käyttöönotto on ollut käynnissä jo muutaman vuoden.

Perusskenaarion mukaan F-kaasujen kokonaispäästöt laskevat 2030 mennessä noin 0,3 Mt CO₂-ekv.:iin. Vuonna 2040 päästöt laskevat tasolle 0,2 Mt CO₂-ekv. ja vuonna 2050 edelleen 0,15 Mt CO₂-ekv.:iin. Perusskenaariossa erityisesti HFC-päästöt laskevat merkittävästi EU-sääntelyn takia. Myös PFC-kaasujen päästöt laskevat, mutta niiden määrä nykyiselläänkin on hyvin pieni. Rikkiheksafluoridiin (SF₆) ei kohdistu EU-lainsäädännöstä tulevia käyttörajoituksia perusskenaariossa. Rikkiheksafluoridin käyttö kasvaa erityisesti sähkönjakelulaitteiden määrän kasvaessa. Perusskenaariossa rikkiheksafluoridille ei ole merkittävässä määrin vaihtoehtoisia aineita sähkönjakelulaitteiden eristekaasuna. Perusskenaariossa sähkönjakelulaitteiden SF₆-kaasupankin kasvuennusteet perustuvat Fraunhofer instituutin (Heckmann & Reinmann 2020)

¹¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=celex:32014R0517>

¹² <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/40/oj/eng>

¹³ Eri kasviuonekaasujen yhteismitallistamisessa käytetyt GWP (global warming potential, ominaislämmitysvaikutus) -kertoimet. Hiilidioksidin GWP-kertoimeksi on määritelty 1, ja muiden kaasujen GWP-kertoimet kertovat kuinka suuri niiden ominaislämmitysvaikutus on verrattuna hiilidioksidiin.

laatiin EU-tason SF₆-kaasupankin kasvuennusteisiin. SF₆-vuodot sähkönjakelulaitteista ovat kuitenkin hyvin pieniä.

F-kaasuille laaditussa politiikka-, eli WAM-skenaariossa keskeisin F-kaasupäästöjä vähentävä toimi on EU:n uusi F-kaasuasetus (573/2024¹⁴), joka astui voimaan 11.3.2024. Asetuksen mukaisilla toimilla lopetetaan neitseellisten HFC-yhdisteiden markkinoille saattaminen kokonaan vuoteen 2050 mennessä. Asetus sisältää myös edelliseen F-kaasuasetukseen verrattuna uusia käyttörajoituksia ja -kieltoja. Vaiheittain voimaantulevilla laite- ja tuotekohtaisilla kielloilla rajoitetaan uusien korkean GWP:n F-kaasuihin perustuvien tuotteiden markkinoille tuloa, kun vaihtoehtoisia, energiatehokkaita teknologioita on käytettävissä. Lisäksi mm. pätevyys- ja vuototarkastusvaatimuksia on laajennettu. Uudistetun F-kaasuasetuksen ohella politiikkaskenaarion toimia ovat informaatio- ja normiohjauksen liittyvät toimet. Käytännössä kyse on toimista, joilla nopeutetaan siirtymää luonnollisiin kylmäaineisiin sekä edistetään kylmäaineiden elinkaaren hallintaa. Toimet pitävät sisällään kestävien julkisten hankintojen kriteereiden päivityksen, kylmäaineiden elinkaaren hallinnan kansallisen suunnitelmaraportin laatimisen sekä talotekniikkaan ja rakennusmääräyksiin liittyvien normistojen ja standardien yhtenäistämisen edistämisen luonnolliset kylmäaineet mahdollistavaan suuntaan turvallisuuskäytännöt huomioon ottaen.

Politiikkaskenaarion mukaan F-kaasujen kokonaispäästöt laskevat 2030 mennessä noin 0,2 Mt CO₂-ekv.:iin. Vuonna 2040 päästöt laskevat tasolle 0,1 Mt CO₂-ekv. ja vuonna 2050 edelleen 0,05 Mt CO₂-ekv.:iin. Politiikkaskenaariossa myös rikkiheksafluoridin päästöt kääntyvät laskuun 2040-luvulla, sillä uudessa F-kaasuasetuksessa kohdistuu sääntelyä sähkönjakelulaitteissa käytettäviin eristekaasuihin.

2.4.10 Muu taakanjakosektori

Taakanjakosektoriin sisältyy edellä esitettyjen liikenteen, työkoneiden, maatalouden, rakennussektorin, F-kaasujen ja jätesektorin lisäksi ETS1-päästökauppasektorin ulkopuolinen teollisuus ja energiantuotanto. Nopeasti kasvava sektori on lisäksi datakeskukset, jotka luokitellaan palvelusektoriin. Datakeskusten eli konesalien osalta on varsin niukasti saatavilla tietoa, mutta skenaariolaskelmissa on arvioitu niiden sähkönkulutuksen nykytasoa ja hukkalämmön määrää verohallinnon tilastotiedon avulla, jonka mukaan vuonna 2024 konesalien sähkönkulutus oli noin 1,3 TWh (Vero 2025) ja olettaen, että datakeskusten sähkönkulutus kasvaisi noin 10 TWh tasoon vuoteen 2050 mennessä, energiatehokkuuden kehitys huomioon ottaen. Kehitystä on arvioitu EK:n (2025) datakkunan avulla ja lisäksi olettamalla, että investointien vauhti tasaantuu pidemmällä aikavälillä. Arviot datakeskusten tulevasta sähkönkulutuksesta sekä toisaalta hukkalämmön määrästä ovat hyvin epävarmat, mikä tulee huomioida tulosten arvioinnissa.

¹⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32024R0573>

2.5 Maankäyttösektori ja sen muutokset

Maankäyttösektorin KEITO-skenaarioiden perustana on PEIKKO-WEM-P-skenaario (Koljonen ym. 2024), jonka maankäyttö ja energiapuunkysyntä on päivitetty TIMES-VTT-mallinnuksen tuloksena tulevien turvetuotanto-, aurinko- ja tuulivoimatietojen sekä energiapuun tarpeen pohjalta. KEITO-WAM-skenaariossa on lisäksi huomioitu maankäyttösektorin WAM-toimien mukanaan tuomat maankäytön muutokset. WAM-skenaariossa aurinkovoimaloista lähes kolmannes sijoittuu turvetuotantoalueille, viljelysmaalle 9 %, metsämaalle 58 % ja jo rakennetuille alueille 1 % karttaselvityksen perusteella. Lisäksi KEITO-skenaarioiden metsämaan MELA-mallinnustulosten jatkokäsittelyssä on otettu käyttöön kasvihuonekaasuinventaarion käyttämät Valtakunnan metsien 13. inventoinnin (VMI13, Korhonen ym. 2024) mittauksiin perustuvat biomassakertoimet, jotka muuntavat runkotilavuuden puun kokonaisbiomassaksi. Näin mallinnettu puustonielu vastaa paremmin mitattua ja inventaarion raportointia puustonielua. Mallinnuksen ja inventaarion yhdenmukaistamiseen käytetty menetelmä ja siihen liittyvä taustatutkimus on kuvattu tarkemmin liitteissä (Liite C).

WEM-skenaarioon sisältyy metsien hiilivarastojen kasvua ja hiilinielujen vahvistamista lisääviä toimia, metsitystä lisääviä ja metsäkatoa vähentäviä toimenpiteitä sekä turvepeltojen päästöjä vähentäviä toimia samalla tavalla kuin PEIKKO-skenaariotarkastelussa (Koljonen ym. 2024). Käytännössä skenaarioon on sisällytetty ne toimet, joille maankäyttösektorin ilmastosuunnitelmassa oli määritelty toteutuspinna-ala (MMM 2022), ja joiden päästövaikutukset oli teknisesti mahdollista laskea (Taulukko 8). Aiemmissa arvioissa näiden toimien yhteenlasketun vaikutuksen on arvioitu olevan noin 4,7 Mt CO₂-ekv. (Ollila ym. 2022, Silfver ym. 2024).

WAM-skenaariossa vettämisestä ja kosteikkoviljelyn pinta-ala-ovat osin laajempia kuin WEM-skenaariossa (Taulukko 8), sillä tutkimusten mukaan Suomessa on runsaasti vettämisestä ja kosteikkoviljelyyn soveltuvaa turvepeltoalaa (Lång ym. 2023, Lehtonen ym. 2024b). Lisäksi ennallistamisasetus edellyttää, että puolet turvepeltojen pinta-alasta ennallistetaan vuoteen 2050 mennessä, josta kolmasosan on oltava vetettyä.

Taulukko 8. Maankäyttösektorin toimenpiteet WEM- ja WAM-skenaarioissa. Taulukossa esitetään vain ne WAM-skenaarion toimenpiteet, jotka poikkeavat WEM-skenaariosta. Ellei toisin mainita, toimenpiteiden oletetaan toteutuvan vuosina 2023–2055.

WEM-skenaarion toimenpiteet	Pinta-ala ja kuvaus
Metsähallituksen ilmastotoimet	Lannoitus 30 000 ha/v Metsä-hallituksen omistamissa metsissä
Ehkäistään metsän muuttumista pelloiksi	Pellonraivaus vähenee 800 ha/v kivennäismailla ja 900 ha/v turvemailla
Joutoalueiden määräaikainen metsitystuki	Metsitetään joutoalueita noin 3 000 ha/v
Heikkotuottoisten metsitykseen soveltuvien peltojen metsitys	Metsitetään turvepeltoja 1 200 ha/v Etelä-Suomessa ja 600 ha/v Pohjois-Suomessa v. 2025–2029
Turvemaan nurmiviljely korotetulla pohjaveden pinnalla -30 cm	20 000 ha v. 2030, 32 500 ha v. 2035
Turvemaan viljely korotetulla vedenpinnalla (ruokohelpi ym.) -30 cm vedenpinnalla	5 000 ha v. 2030, 10 000 ha v. 2035
Turvemaan viljely korotetulla vedenpinnalla (osmankäämi, kihokki tms.) -5 – -10 cm vedenpinnalla	2 500 ha v. 2030, 5 000 ha v. 2035
Turvepellon ilmastokosteikko	4 000 ha v. 2030, 7 500 ha v. 2035
Turvepeltojen nurmet	40 000 ha/v*
Vetetään huonotuottoisia, paksuturpeisia peltoja ja suonpohjia kosteikoiksi	Turvepeltoja 10 000 ha v. 2030, suonpohjia 20 000 ha v. 2030
Kunnostusojituksen välttäminen harvennusten yhteydessä rehevien korpien lisäksi myös karuilla rämeillä	Tavoitteena HIISI-WAM-skenaarion tuloksena saatu kunnostusojitusalan pieneneminen 1 000 ha/v, lopullinen kunnostusojitusala saadaan MELA-laskelman tuloksena
Yläharvennukset rehevissä korvissa kiertoajan viimeisenä harvennuksena ennen uudistamista	Tavoitteena HIISI-WAM-skenaarion tuloksena saatu yläharvennusten pinta-ala 6 000 ha/v, lopullinen yläharvennusten pinta-ala saadaan MELA-laskelman tuloksena
Edistetään suometsien tuhkalannoitusta	37 000 ha/v (lisäys 26 000 ha/v)
Edistetään kivennäismaametsien lannoitusta	50 000 ha/v (lisäys 24 000 ha/v)

Edistetään metsien nopeaa ja tehokasta uudistumista	Metsät uudistetaan viipymättä uudistushakkuun jälkeen kaikissa metsävaraskenaarioissa
Lisätään lahopuun hiilivarastoa talousmetsiin monimuotoisuus- ja ilmastosyistä säästöpuita jättämällä	Uudistushakkuissa valittavien säästöpuiden hehtaarikohtaista määrää nostetaan 5:stä 7:ään m3
WAM-skenaarion toimenpiteet	Pinta-ala ja kuvaus
Heikkotuottoisten metsitykseen soveltuvien peltöjen metsitys	Metsitetään turvepeltoja 1600 ha/v Etelä-Suomessa ja 800 ha/v Pohjois-Suomessa v. 2025–2029
Turvemaan nurmiviljely korotetulla pohjaveden pinnalla -30 cm	20 000 ha v. 2030, 40 000 ha v. 2035
Turvemaan viljely korotetulla vedenpinnalla (ruokohelpi ym.) -30 cm vedenpinnalla	5 000 ha v. 2030, 15 000 ha v. 2035
Vetetään huonotuottoisia, paksuturpeisia peltoja ja suonpohjia kosteikoiksi	Turvepeltoja 10 000 ha v. 2030, 40 000 ha v. 2035, suonpohjia 20 000 ha v. 2030
Turvellon ilmastokosteikko	4000 ha v. 2030, 10 000 ha v. 2035

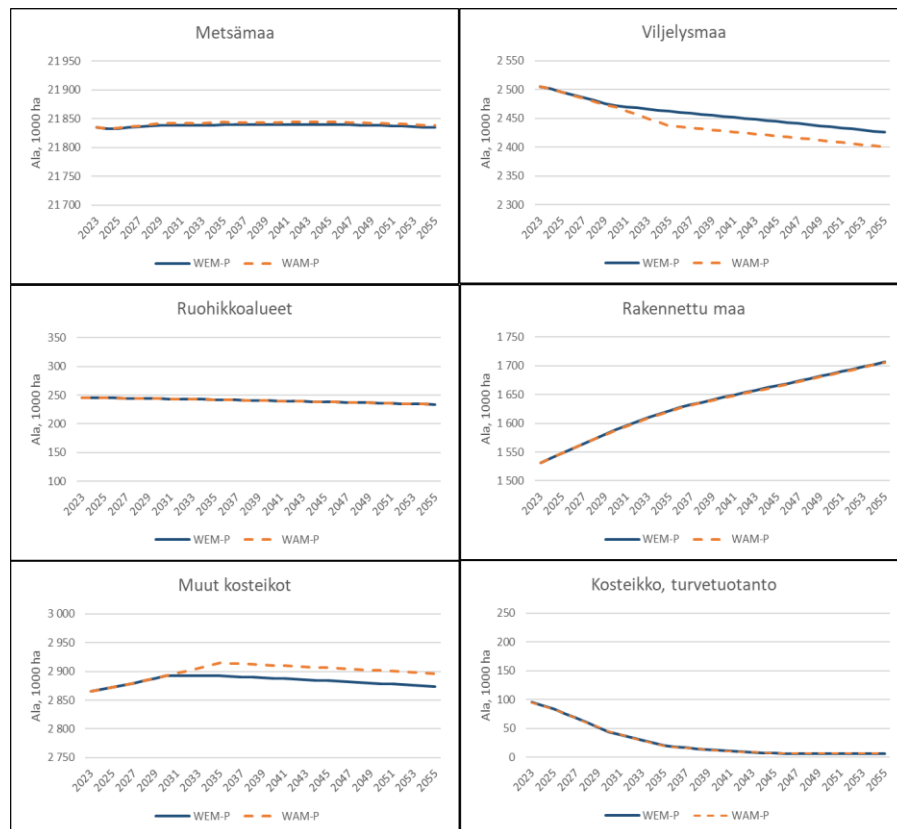
* Lisäistä nurmea vuosina 2025–2055 vain 10 000 ha nelivuotisessa viljelykierrossa

Metsien käyttöön ja hoitoon kohdistuvat WAM-toimet (metsien kiertoaikojen pidentäminen vähäisen tuhoriskin alueilla, metsien kasvattaminen tiheämpinä, metsänlannoituksen lisääminen ja tiukka lisäsuojelu) vaikuttivat laskelmissa sekä metsien hakkuumahdollisuuksiin että hakuiden alueelliseen kohdentumiseen (ks. luku 2.5.2), minkä vuoksi hakkuista ohjautui ilmaston kannalta epäedullisempiin kohteisiin. Tämän vuoksi metsätalouden WAM-toimet jätettiin kokonaisuudessaan lopullisen WAM-skenaariolaskelman ulkopuolelle.

2.5.1 Maankäytön kehittyminen

Maankäyttöluokkien pinta-alojen kehitys on esitetty Kuva 8. Kosteikoissa on eroteltu muut kosteikot ja turvetuotantoalat toisistaan, koska niiden kehityskulku poikkeaa toisistaan. Lähtökohtana on KHK-inventaarion pinta-alat vuonna 2023, minkä jälkeen luvut ovat skenaarioiden mukaisia. WEM- ja WAM-skenaarioiden välillä suurimmat pinta-alaerot ovat viljelysmailla ja muissa kosteikoissa. Viljelysmaan alassa on laskeva trendi mm. raivausalan pienenemisen, heikkotuottoisten peltöjen metsityksen ja ilmastokosteikkojen perustamisen vuoksi. WAM-alat pienevät voimakkaammin lähinnä siksi koska peltöjen metsitetään ja muutetaan enemmän kosteikoiksi kuin WEM-skenaariossa. Tämän seurauksena WAM-skenaariossa suurempi osa viljelysmaan alan vähenemästä kohdistuu turvepelloille. Metsämaan ala ei juuri muutu vuosina 2023–2055, mutta kivennäismailla oleva ala laskee yli 60 000 ha ja turvemaametsien ala kasvaa vastaavasti etenkin turvetuotantoalueiden metsittämisen vuoksi. Turvetuotantoala

laskee muutamaan tuhanteen hehtaariin molemmissa skenaarioissa. Rakennetun maan ala kasvaa loivenevasti aikasarjan loppua kohti.



Kuva 8. Maankäyttöluokkien pinta-alojen kehitys vuosina 2023–2055 WEM- ja WAM-skenaarioissa.

Maankäyttöluokkien väliset muutospinta-alat on esitetty liitteessä D. Metsäkatoalaa on molemmissa skenaarioissa hieman yli 280 000 ha vuosien 2024–2055 aikana. WEM-skenaariossa metsitysala vastaa metsäkatoalaa, kun taas WAM-skenaariossa metsitysala on noin 3 000 ha suurempi kuin metsäkatoala. Maankäytön muutosten seurauksena turvemaametsien ala kuitenkin kasvaa ja kivennäismaametsien ala vähenee yli 60 000 ha. Eniten uutta metsämaa-alaa tulee ruohikkoalueista, yli 100 000 ha. Myös rakennetusta maasta, muista kosteikoista ja turvetuotantoalueista tulee kustakin luokasta noin 50 000–60 000 ha uutta metsäalaa molemmissa skenaarioissa. WAM-skenaariossa metsitysalat ovat hieman WEM-skenaariota suuremmat. Pääosa metsäkadosta johtuu rakentamisesta. Maankäyttöön liittyvistä toimista johtuen skenaarioissa

metsämaasta viljelysmaaksi raivattava ala on huomattavan pieni, vain noin 30 000 ha vuosina 2024–2055. Kaikkiaan uutta viljelysmaata tulee noin 60 000 ha. Ruohikkoalueiksi siirtyvistä aloista suurin osa tulee viljelysmaista. Uutta rakennettua alaa tulee molemmissa skenaarioissa noin 225 000 ha vuosina 2024–2055 lähinnä metsämaasta.

Osin vettämistoimien seurauksena uutta kosteikkoalaa tulee WEM-skenaariossa noin 74 000 ha ja WAM-skenaariossa noin 97 000 ha. Uutta turvetuotantoalaa raivataan pienessä määrin. Poistuvaa turvetuotantoalaa on noin 90 000 ha molemmissa skenaariossa ja enimmillään noin 8 000 ha vuodessa, valtaosa vuoteen 2035 mennessä.

2.5.2 Metsäsektorin kehitys

MELA-laskelmissa käytettävät hakkuukertymätavoitteet perustuvat oletuksiin metsäteollisuuden puuntarpeesta, metsähakkeen ja pientalojen polttopuun käyttömääristä sekä puun tuonnista. Metsäteollisuuden puuntarpeen ja ainespuun hakkuukertymätavoitteen osalta WEM- ja WAM-skenaariot vastaavat PEIKKO WEM-P-skenaariota. Sen sijaan energiarunkopuun ja hakkuutähteiden osalta sekä WEM- ja WAM- että PEIKKO WEM-P-skenaarioiden välillä on pieniä eroja.

Metsäteollisuuden tuotantomäärät (Taulukko 9) ja puuntarve vastaavat sekä WEM- että WAM-skenaarioissa PEIKKO-hankkeen WEM-P-skenaariota (Koljonen ym. 2024, s. 46–53). Myös oletus raakapuun tuonnista on sama kuin PEIKKO WEM-P-skenaariossa: venäläisen tuontipuun ja polttohakkeen määrien ei oleteta skenaarioiden tarkasteluajanjaksolla elpyvän, vaan korvaava puumäärä pyritään pääsääntöisesti hankkimaan kotimaasta. Itämeren alueen maista arvioidaan tuotavan 500 000 kuutiometriä lehtikuitupuuta ja 500 000 kuutiometriä havukuitupuuta enemmän kuin vuosina 2016–2021 keskimäärin. Puun nettotuonnin (puun tuonti vähennettynä puun viennillä) arvioidaan tarkasteluajanjaksolla olevan yhteensä noin 3,5 miljoonaa kuutiometriä vuodessa.

Taulukko 9. Metsäteollisuuden tuotantomäärät 2020–2055 WEM- ja WAM-skenaarioissa.

	Yksikkö	2020*	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Paperi	1 000 t	4514	3590	3200	2450	2350	2300	2300	2300
Kartonki	1 000 t	3680	4350	5500	2750	5750	5750	5750	5750
Paperi + Kartonki	1 000 t	8194	8300	8700	8200	8100	8050	8050	8050
Massa**	1 000 t	2844	2090	2540	2140	2140	2140	2140	2140
Sellu	1 000 t	7681	8130	8130	8130	8130	8130	8130	8130
Massa yhteensä	1 000 t	10525	10220	10670	10270	10270	10270	10270	10270
Sahatavara	1 000 m³	10919	12900	13450	13450	13450	13450	13450	13450
Vaneri (sis. LVL)	1 000 m³	990	1130	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Muut levyt	1 000 m³	137	141	146	148	150	150	150	150

*Vuoden 2020 luvut perustuvat tilastoihin.

**Sisältää mekaanisen ja puolikemiallisen massan

WEM- ja WAM-skenaarioissa kotimaisen metsähakkeen kysyntä lämpö- ja voimalaitoksissa (Taulukko 10) sekä pientalojen polttopuun käytön määrä on tuotettu TIMES-VTT-mallinnuksen optimoinnin tuloksena (ks. luku 3.1). Johtuen TIMES-VTT mallinnuksen lähtöoletuksista, metsähakkeen ja polttopuun kysynnot eroavat rakenteellisesti hieman PEIKKO WEM-P-skenaariosta. WEM-skenaariossa kotimaisen metsähakkeen käyttö on hieman pienempää vuodesta 2030 eteenpäin kuin PEIKKO WEM-P-skenaariossa. Vastaavasti pientalojen polttopuun käyttö aluksi hieman lisääntyy PEIKKO WEM-P-skenaarioon verrattuna, kunnes vuoden 2040 jälkeen käyttö suhteessa alenee. WAM-skenaariossa metsähakkeen käyttö kasvaa vuoden 2040 jälkeen samalla, kun pientalojen polttopuun käyttö alenee merkittävästi vaihtoehtoisten energialähteiden käyttöönoton myötä.

Taulukko 10. Kotimaisen metsähakkeen käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa sekä pientalojen polttopuun käyttö WEM- ja WAM-skenaarioissa sekä PEIKKO WEM-P-skenaariossa.

	Yksikkö	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
PEIKKO WEM-P									
Metsähake	1 000 m ³	5650	10198	10824	11281	11335	11563	11721	11946
Pientalojen polttopuu	1 000 m ³	7064	6342	6213	5841	5989	5750	5501	5388
Yhteensä	1 000 m³	12714	16540	17037	17122	17324	17313	17222	17334
WEM-skenaario									
Metsähake	1 000 m ³	5650	10230	10593	10598	11091	10912	10976	10948
Pientalojen polttopuu	1 000 m ³	7064	6519	6465	6157	5993	5407	5252	4962
Yhteensä	1 000 m³	12714	16749	17058	16755	17084	16319	16228	15910
WAM-skenaario									
Metsähake	1 000 m ³	5650	10210	10530	10781	10931	12485	13016	12946
Pientalojen polttopuu	1 000 m ³	7064	6512	6480	6135	5623	4837	3887	2966
Yhteensä	1 000 m³	12714	16722	17010	16916	16554	17322	16903	15912

Metsävarojen kehitys WEM- ja WAM-skenaarioissa mallinnettiin Luken MELA-ohjelmiston (Hirvelä ym. 2017) avulla käyttäen samoja metsävara-aineistoja ja pääosin samoja laskentaoletuksia kuin PEIKKO-hankkeen raportissa kuvatuissa skenaarioissa (Koljonen ym. 2024). Skenaariolaskennassa puun käyttötarvearvioista johdettuja alueellisia 10-vuotiskausille määriteltyjä hakkuukertymiä perustuen edellä esitettyihin teollisuuden ja energiasektorin kysyntäarvioihin käytettiin maakunnittaisina korjuumääritavoitteina, ja näille ehdolliset arviot hakkuiden kohdentumisesta ja metsien tulevasta kehityksestä saatiin skenaariolaskennan tuloksena laadituille skenaarioille. Laskenta toteutettiin maakunnittain optimointiin perustuen, jossa maksimoitavana tavoitemuuttajana oli nettotulojen nykyarvo neljän prosentin reaalikorkokannalla laskettuna. Laskennassa käytetty valtakunnan metsien inventoinnin aineisto vastasi metsävarojen tilannetta keskimäärin vuonna 2019, joka oli myös skenaariolaskennan aloitusvuosi (Koljonen ym. 2024).

Energiapuun tavoitekorjuumääriä lukuun ottamatta WEM-skenaarion laskentamäärittelykset olivat samat kuin PEIKKO-raportissa (Koljonen ym. 2024) esitettyssä WEM-P-skenaariossa. Kuten MISU- ja PEIKKO-skenaariotarkasteluissa (Ollila ym. 2022, Silfver ym. 2024, Koljonen ym. 2024), myös WEM-skenaariossa otettiin metsien käsittelyssä huomioon hiilinielujen ja monimuotoisuuden lisäämiseen tähtääviä toimia: kivennäismaiden kasvatuslannoitusta ja turvemaiden tuhkalannoitusta lisättiin yhteensä 117 000 hehtaariin vuodessa, kunnostusojitusta

ei tehty harvennushakkuun yhteydessä rehevien korpien lisäksi myöskään karuilla rämeillä, osa puuston kiertoajan viimeisistä harvennushakkuista tehtiin rehevissä korvissa yläharvennustyyppisinä ja uudistushakkuissa säästöpuina kasvamaan jätettävän puuston määrää lisättiin (Taulukko 8). Toimien tarkempi määrittäminen on esitetty raportissa Koljonen ym. (2024).

MISU- ja PEIKKO-skenaariotarkastelujen mukaisesti oletettiin, että metsät uudistetaan viipymättä uudistushakkuun jälkeen, taimikonhoito tehdään aina metsänhoidon suosituksiin perustuen ja että jalostetun viljelymateriaalin mahdollinen vaikutus sisältyy laskelmissa sovellettuun kasvuntasoon (Maanaviija ym. 2021). Muilta osin skenaarioiden laskentamääritykset pohjautuivat MELA Tulospalvelun VMI12–VMI13-laskelmakierroksen määrityksiin (Luke 2023a). Puuston kasvu- ja kehitysmallit sekä kasvuntason kalibrointi olivat samat kuin MISU- ja PEIKKO-skenaariotarkasteluissa (Koljonen ym. 2024), ja näihin perustuen puuston kasvuarvot saatiin skenaariolaskennan tuloksena.

WAM-skenaarion perustana toimi WEM-skenaario, jota täydennettiin neljällä WAM-politiikkatoimella: metsien ohjekiertoaikojen pidentäminen, metsien kasvattaminen tiheämpinä, metsänlannoituksen lisääminen ja metsien tiukka lisäsuojelu (Taulukko 11). Näiden toimien yhteisvaikutukset metsävarojen kehitykseen esitetään alempana. Toimia ei kuitenkaan sisällytetty lopulliseen WAM-skenaarioon, koska ne vaikuttivat hakkuumahdollisuuksiin ja siirsivät hakkuuita ilmaston kannalta epäedullisempiin kohteisiin.

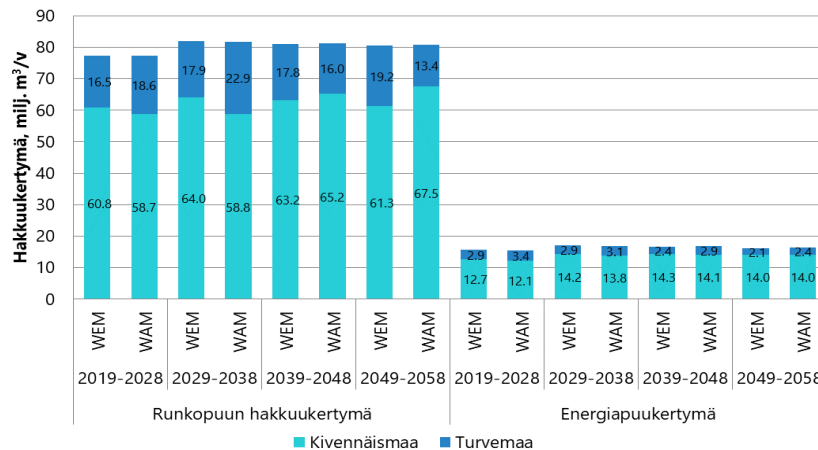
Politiikkatoimista kiertoaikojen pidentäminen ja tiheämpänä kasvattaminen kohdennettiin mänty- ja kuusivaltaisiin kivennäismaiden metsiin lukuun ottamatta kuusivaltaisia metsiä Uudenmaan, Päijät-Hämeen, Kymenlaakson, Etelä-Karjalan ja Pohjanmaan maakuntien alueita mahdollisesti lisääntyvien tuhoriskien takia. Lannoituksen lisääminen kohdennettiin turvemaiden tuhkalannoituksiin. Metsien lisäsuojelu kohdennettiin Kansallinen metsästrategia 2035:n valmistelua varten laaditun taustaselvityksen (Kärkkäinen ym. 2022) mukaisesti. Lisäsuojelusta 74 prosenttia kohdentui Etelä-Suomen ja 26 prosenttia Pohjois-Suomen alueelle. Kivennäismaiden osuus lisäsuojelusta oli 69 prosenttia ja turvemaiden 31 prosenttia. Lisäsuojelu otettiin huomioon heti laskennan alusta alkaen.

Taulukko 11. WAM-skenaarion politiikkatoimet metsävarojen kehityksen mallinnuksessa. Toimia ei sisällytetty lopulliseen maankäyttösektorin WAM-laskelmaan.

WAM-toimenpide	Pinta-ala ja kuvaus
Metsien ohjekiertoaikojen pidentäminen	Mänty- ja kuusivaltaiset kivennäismaan metsät tietyin poikkeuksin. Puuston keskiläpimittaan perustuvissa uudistamiskriteereissä puulaji- ja kasvupaikkakohtainen lisäys 2–3 cm. Puuston keski-ikään perustuvissa uudistamiskriteereissä lisäys 10 v.
Metsien kasvattaminen tiheämpinä	Mänty- ja kuusivaltaiset kivennäismaan metsät tietyin poikkeuksin. Perustui pidennetyn kiertoajan harvennusmalleihin (Metsänhoidon suositukset 2025)
Lannoitusalan lisääminen	WEM:n mukaista vuotuista lannoitusala lisättiin 3000 ha, jolloin lannoitusala yhteensä 120 000 ha/v. Lisäys turvemaiden tuhkalannoitusta.
Metsien tiukka lisäsuojelu	Yksityismetsien metsämaalla 60 000 ha, lähtökohtana metsien suojelu ja talousmetsien monimuotoisuuden turvaaminen yksityismetsissä (Helmi-elin ympäristöohjelma ... 2021). Kohdentaminen Kansallinen metsästrategia 2035:n valmistelua varten laaditun taustaselvityksen (Kärkkäinen ym. 2022) mukaisesti.

Laskennan tuloksena saatu runkopuun vuotuinen hakkuukertymäarvio on WEM-skenaariossa 77,4 ja WAM-skenaariossa 77,2 miljoonaa kuutiometriä vuosina 2019–2028 (kuva 9). Seuraavalla 10-vuotiskaudella, vuosina 2029–2038, vuotuinen kertymäarvio on WEM-skenaariossa 81,9 ja WAM-skenaariossa 81,7 miljoonaa kuutiometriä, josta se pienenee tarkastelujakson kuluessa ollen WEM-skenaariossa 80,5 ja WAM-skenaariossa 80,9 miljoonaa kuutiometriä vuosina 2049–2058 (Liite E).

Energiapuukertymän arvio vuosina 2019–2028 on WEM-skenaariossa 15,6 ja WAM-skenaariossa 15,5 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Arvio on suurimmillaan vuosina 2029–2038, WEM-skenaariossa 17,1 ja WAM-skenaariossa 16,9 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, josta se pienenee tarkastelujakson kuluessa WEM-skenaariossa 16,1 ja WAM-skenaariossa 16,5 miljoonaan kuutiometriin.



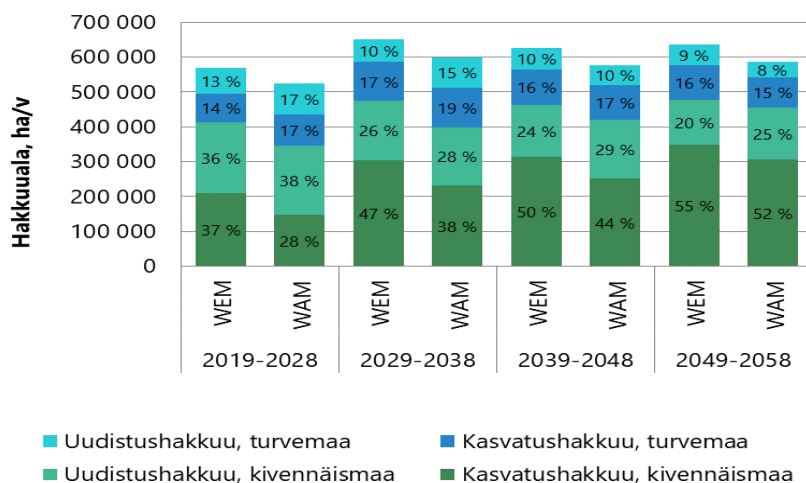
Kuva 9. Runko- ja energiapuun vuotuiset hakkuukertymät puuntuotannossa olevalla metsämaalla WEM- ja WAM-skenaarioiden mukaan koko maassa 10-vuotiskausittain. Runkopuun hakkuukertymässä on mukana ainespuu (tukki- ja kuitupuu) ja energiarunkopuu. Energiapuukertymä sisältää energiarunkopuun lisäksi energiakäyttöön korjatut puiden oksat, lehdet, kannot ja juuret.

Vaikka WEM- ja WAM-skenaarioiden runko- ja energiapuun kokonaiskertymäarviot ovat lähellä toisiaan, niin laskelmissa optimoinnilla valituissa hakkuukohteissa on eroja skenaarioiden välillä. Skenaariolaskennassa osa WAM-toimista vähentää metsien hakkuumahdollisuuksia ja asetettujen hakkuukertymätavoitteiden saavuttamiseksi hakkuita ja muita metsätoimenpiteitä kohdentuu metsiin eri tavalla WEM- ja WAM-skenaarioissa. WAM-toimien samanaikaisen soveltamisen yhteisvaikutuksena kahdella ensimmäisellä 10-vuotiskaudella, vuosina 2019–2028 ja 2029–2038, turvemaiden osuus runkopuun kertymäarviosta on suurempi WAM-skenaariossa kuin WEM-skenaariossa (kuva 9). Vuosina 2029–2038 WAM-skenaariossa runkopuuta korjataan kivennäismailta 58,8 ja turvemailta 22,9 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. WEM-skenaariossa vastaavat kertymäarviot ovat 64,0 ja 17,9 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Tarkastelujakson kahdella jälkimmäisellä 10-vuotiskaudella, vuosina 2039–2048 ja 2049–2058, hakkuiden kohdentuminen muuttuu ja turvemaiden osuus kertymäarviosta kasvaa suuremmaksi WEM-skenaariossa kuin WAM-skenaariossa.

Hakkuiden erilainen kohdentuminen vaikuttaa myös runkopuun puulajikohtaisiin hakkuukertymäarvioihin. WEM-skenaariossa vuosina 2019–2028 runkopuun kertymäarviosta on mäntyä 48, kuusta 34 ja lehtipuuta 18 prosenttia. WAM-skenaariossa männyn osuus on pienempi, 42 prosenttia. Kuusen osuus on 38 ja lehtipuiden 20 prosenttia. Koko 40 vuoden tarkastelujaksolla männyn osuus WEM-skenaarioiden runkopuun kertymäarviosta on 47, kuusen 36 ja lehtipuiden 16 prosenttia. WAM-skenaariossa vastaavat osuudet ovat 46, 36 ja 18 prosenttia.

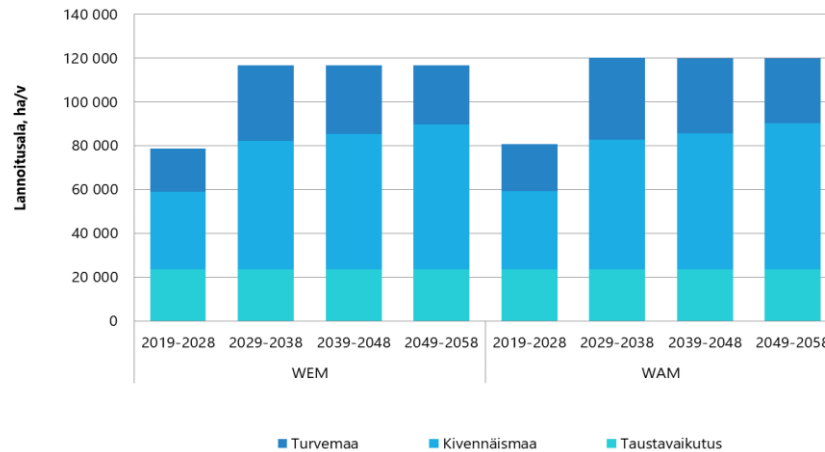
Hakkuiden erilaisen kohdentumisen seurauksena kokonaishakkuuala on WAM-skenaariossa pienempi kuin WEM-skenaariossa (Kuva 10). Siten WAM-

skenaariossa keskimääräinen hehtaarikohtainen hakkuukertymä on suurempi kuin WEM-skenaariossa. Ero hakkuualueella on 8 prosenttia sekä vuosina 2019–2028 että keskimäärin koko 40 vuoden tarkastelujakson aikana. WAM-skenaariossa erityisesti kasvatushakkuiden hakkuualue kivennäismailla (koko tarkastelujakso) on pienempi ja uudistushakkuiden hakkuualue turvemaiden (kaksi ensimmäistä 10-vuotiskautta) on suurempi kuin WEM-skenaariossa. Hakkuut kohdentuvat WAM-skenaariossa enemmän turvemaiden, sillä WAM-skenaariossa myös kasvatushakkuiden hakkuualue turvemaiden on kahden ensimmäisen 10-vuotiskauden aikana suurempi kuin WEM-skenaariossa. Uudistushakkuiden hakkuualue kivennäismailla on WAM-skenaariossa hieman pienempi kuin WEM-skenaariossa kahdella ensimmäisellä 10-vuotiskaudella.



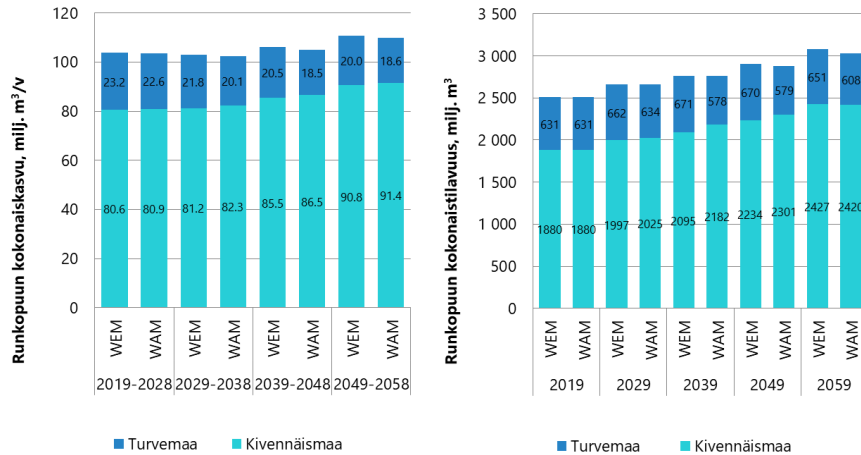
Kuva 10. Kasvatus- ja uudistushakkuiden vuotuiset pinta-alat puuntuotannossa olevalla metsämaalla WEM- ja WAM-skenaarioiden mukaan koko maassa 10-vuotiskausittain. Kasvatushakkuualueen sisältyvät harvennushakkuiden ja ylispuiden poistoon tähtäävien hakkuiden pinta-alat.

Kivennäismaiden kasvatuslannoitusten ja turvemaiden tuhkalannoitusten vuotuinen kokonaisala on WAM-skenaariossa 120 000 ha/v, joka on 3 000 ha/v suurempi kuin WEM-skenaariossa (Kuva 11). WAM-skenaariossa lisäys kohdistuu kokonaan turvemaiden tuhkalannoituksiin. Ensimmäisen 10-vuotiskauden lannoitusalan muita 10-vuotiskausia alempi taso johtuu siitä, että lannoitusten pinta-alatavoitteen noudattaminen aloitetaan vasta ensimmäisen 10-vuotiskauden aikana.



Kuva 11. Kivennäismaiden kasvatuslannoitusten ja turvemaiden tuhkalannoitusten vuotuiset pinta-alat puuntuotannossa olevalla metsämaalla WEM- ja WAM-skenaarioiden mukaan koko maassa 10-vuotiskausittain. Kuviossa on esitetty myös laskelmissa kalibroituun kasvuntasoon sisältyvän lannoituksen taustavaikutuksen pinta-ala.

WEM-skenaariossa runkopuun vuotuisen tilavuuskasvun arvio on keskimäärin noin 106 miljoonan kuutiometrin tasolla 40 vuoden tarkastelujakson aikana (Kuva 12). Arvio on ensimmäisellä 10-vuotiskaudella 103,7 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, josta se nousee tarkastelujakson kuluessa 110,7 miljoonaan kuutiometriin. WAM-skenaariossa vuotuinen tilavuuskasvun arvio on 10-vuotiskausittain 0,2–1,0 miljoonaa kuutiometriä pienempi kuin WEM-skenaariossa, ja tilavuuskasvun pieneneminen kohdistuu turvemaihin. Kivennäismailla puuston tilavuuskasvun arvio on WAM-skenaariossa suurempi kuin WEM-skenaariossa koko tarkastelujakson ajan. Tilavuuskasvun eroihin vaikuttavat erityisesti WAM-toimista johtuvat muutokset hakkuiden ja muiden metsätoimenpiteiden kohdentumisessa sekä lisäksi muutokset energiapuun korjuumäärätavoitteissa skenaarioiden välillä.



Kuva 12. Runkopuun a) vuotuinen kokonaiskasvu ja b) kokonaistilavuus 10-vuotiskausittain koko metsä- ja kitumaalla WEM- ja WAM-skenaarioiden mukaan koko maassa.

WEM-skenaariossa puuston runkotilavuuden metsä- ja kitumaalla arvioidaan lisääntyvän alkutilanteen 2 511 miljoonasta kuutiometristä 40 vuoden aikana 3 078 miljoonaan kuutiometriin (lisäystä 23 prosenttia). WAM-skenaariossa runkotilavuusarvio on tarkastelujakson lopussa vajaa 2 prosenttia pienempi kuin WEM-skenaariossa. Puuston runkotilavuus kivennäismailla on tarkastelujakson lopussa samalla tasolla molemmissa skenaarioissa, mutta turvemailla runkotilavuus on WAM-skenaariossa vajaa 7 prosenttia pienempi kuin WEM-skenaariossa.

Runkotilavuuden puulajijakauma muuttuu skenaarioissa hieman tarkastelujakson aikana. Laskelmien alkutilanteessa männyn osuus runkotilavuudesta on 50, kuusen 30 ja lehtipuiden 20 prosenttia. WEM-skenaariossa vastaavat osuudet ovat tarkastelujakson lopussa 49, 31 ja 20 prosenttia sekä WAM-skenaariossa 51, 30 ja 19 prosenttia. Vastaavasti kuin puuston tilavuuskasvunkin osalta, myös runkotilavuuden kehitykseen ja eroihin skenaarioiden välillä vaikuttavat WEM- ja WAM-skenaarioiden väliset erot laskentaoletuksissa.

Laaditut arviot kuvaavat sitä, miten valitut WAM-toimet vaikuttavat samanaikaisesti sovellettuna laskentakehikossa, joka koostuu käytettyjen laskentaohjelmiston ja -aineiston, sovellusmääritysten, laskennassa jo mukana olevien MISU-toimien, etukäteen asetettujen hakkuukertymätavoitteiden sekä simuloinnin ja optimoinnin muodostamasta kokonaisuudesta. Arviot ilmentävät myös tulevaisuuteen ulottuvan skenaariolaskennan epävarmuutta, joka lisääntyy sitä enemmän mitä pidemmälle skenaariolaskenta ulottuu. Erilaisilla laskentaoletuksilla ja -menetelmillä WAM-toimien vaikutukset voivat poiketa tässä havaituista (Hynynen ym. 2024, MMM 2025a).

3 Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasupäästöjen kehitys

Antti Lehtilä, VTT

3.1 Energian hankinta

Energian kotimaista kokonaiskulutusta mitataan energiatilastoinnissa primaarienergian avulla. Se käsittää kaiken primaarisen energian kotimaisen tuotannon sekä energiahyödykkeiden nettotuonnin. Koska primaarienergian kulutuksesta on vähennetty energian nettovienti, sen voidaan katsoa edustavan energian kotimaista kokonaiskulutusta. Primaarinen energia koostuu energialähteiden raaka-ainemuodoista ennen jatkojalostusta esimerkiksi sähköksi, lämmöksi tai polttoaineiksi.

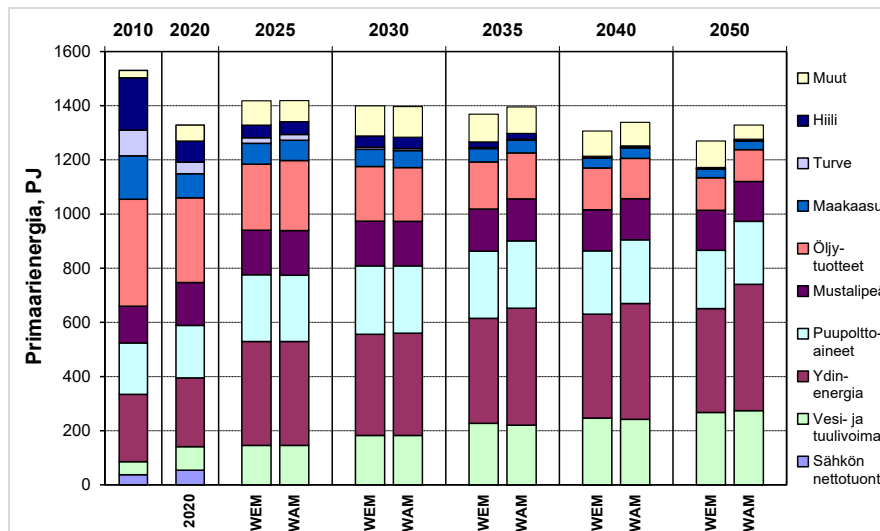
Tässä työssä primaarienergian kokonaiskulutus on mallinnettu ja raportoitu yhdenmukaisesti IEA:n (International Energy Agency) energiataseiden kanssa, joten luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia kansallisen energiatilastoinnin kanssa. Malli on globaali ja kalibroitu siten kaikkien maiden osalta tilastoihin, mutta on huomattava, että esimerkiksi vuosi 2020 oli monessa suhteessa hyvin poikkeuksellinen, joten kalibroinnissa on pyritty puhdistamaan tilastovuosien poikkeuksellisten olosuhteiden vaikutukset energiajärjestelmän tulevaisuuden projektioihin.

Energian kokonaiskulutus on WEM-skenaariossa korkeimmillaan noin 1400 PJ (vajaat 400 TWh) vuonna 2025, jonka jälkeen kulutus alkaa jo pienentyä (Kuva 13). Ydinvoima on alhaisen laskennallisen hyötysuhteensa takia suuri yksittäinen primaarienergian kulutusta lisäävä tekijä, joka heijastuu skenaarioiden kokonaiskulutusten eroissa. Uusiutuvan tuuli- ja aurinkoenergian hyödyntämisen voimakas kasvu puolestaan aiheuttaa jo itsessään nimellistä energian käytön tehostumista, mutta sen lisäksi aitoa tehostumista syntyy energian loppukäytön sähköistymisen myötä, sillä monissa käyttökohteissa sähköistyminen parantaa merkittävästi loppukäytön energiatehokkuutta. WEM- ja WAM-skenaariotulokset viittaavat selkeästi siihen, että Suomessa energian kokonaiskulutuksen kytkentä talouskasvuun voi pysyä varsin heikkona myös pidemmällä tähtäimellä. Joissakin muissa arvioissa esitetyt, erityisesti sähköenergian osalta paljon voimakkaamman energiankäytön kasvun skenaariot, jotka pohjautuvat muun muassa vetytalouden, datakeskusten ja sähköpolttoaineiden tuotannon oletettuun nopeaan laajenemiseen, voivat kuitenkin johtaa kytkennän voimistumiseen uudelleen.

Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä (LULUCF-sektori pois lukien) energiaperäisten päästöjen osuus on Suomessa ollut pitkään lähes 80 %, joten energian kokonaiskulutus ja sen jakaantuminen eri energialähteisiin vaikuttavat keskeisesti päästöjen kehitykseen. Primaarienergian kokonaiskulutuksesta fossiilisten polttoaineiden ja turpeen osuus oli vuonna 2023 enää noin 30 %, kun niiden osuus oli vielä vuonna 2010 noin 54 % (IEA 2023, Tilastokeskus 2025c). Niiden osuus laskee WEM- tulosten mukaan vuonna 2030 noin 24 %:iin, vuonna 2040 noin 17 %:iin ja 2050 noin 14 %:iin. WAM-skenaariossa kehitys on hyvin samankaltainen. Uusiutuvan energian osuudet vastaavasti kasvavat WEM- ja WAM-skenaarioissa.

Vuoteen 2030 mennessä merkittävimmin vähenevät turpeen ja kivihiilen energiakäyttö, mutta myös maakaasun kokonaiskäyttö vähenee tuntuvasti vuoden 2020 tasosta. Turpeen ja kivihiilen käytön väheneminen heijastuu kummassakin skenaariossa bioenergian, etenkin puupolttoaineiden mutta jossain määrin myös muun bioenergian käytön kasvuna, mikä johtuu pääosin kauko- ja prosessilämmön merkityksestä Suomen energialähteistään.

Uusiutuvan energian osuus oli vuonna 2023 noin 40 % primaarienergiasta, ja osuuden kasvu jatkuu kummassakin skenaariossa huomattavana. WEM-skenaariossa se nousee vuoteen 2030 mennessä 49 %:iin ja 2050 mennessä lähes 60 %:iin, mutta jää WAM-skenaariossa ydinvoiman kasvun takia hieman alemmaksi. Uusiutuvan energian ja jättepolttoaineiden kokonaiskäyttö ylittää kummassakin skenaariossa 730 PJ:n määrän vuonna 2030 (Kuva 14). Vaikka puuperäisen energian kysyntä kasvaa tulosten mukaan skenaarioissa vuoteen

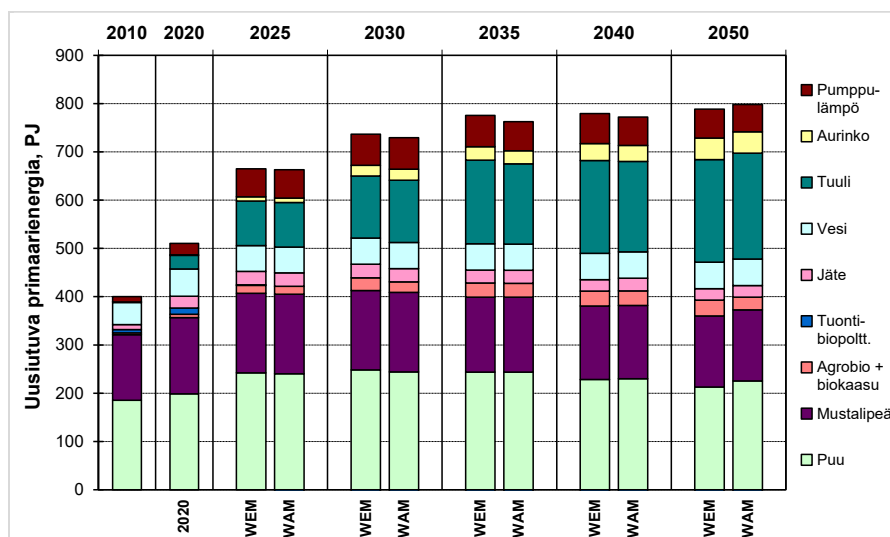


Kuva 13. Primaarienergian kokonaiskulutuksen kehitys energialähteittäin WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050 (sisältää IEA:n tilastointikäytännön mukaisesti polttoaineiden raaka-ainekäytön kokonaistaseiden täsmäyttämiseksi).

2030 saakka, kasvusta suuri osa syntyy suoraan metsäteollisuuden tuotannon ja raaka-ainepuun kasvun myötä sivutuotevirtoina. Ainespuuksi huonosti soveltuvaa harvennusten pienpuuta lukuun ottamatta runkopuuta ei ole oletettu voitavan käyttää primaarisesti energiaksi. Energiapuun lisätuonnilla puun energiakäyttöä voitaisiin kasvattaa, mutta Venäjän-kaupan sulun ja kestävyysnäkökohtien perusteella tuonti oli tarkastelussa rajoitettu korkeintaan alle 2 TWh:n määrään, kun se oli esimerkiksi vuonna 2020 vajaat 4 TWh.

Tuuli- ja aurinkoenergia saavat WEM-skenaariossa merkittävän aseman uusiutuvan energian hankinnassa jo lähitulevaisuudessa, ja ilman uusia politiikkatoimia. Vielä vuonna 2023 niiden osuus oli vielä alle 10 % uusiutuvasta energiasta (Tilastokeskus 2025c), mutta WEM-tulosten mukaan osuus nousee vuoteen 2030 mennessä 21 %:iin ja vuonna 2050 35–38 %:iin. Skenaarioiden laskentaoletuksissa on huomioitu julkisiin lähteisiin perustuvat tiedot suomalaisista investointipäätöksistä vuoteen 2030 asti, mutta pidemmän tähtäimen tuulivoima-investointien osalta on hyvä pitää mielessä, että uusien investointien tulevaa kohdentumista Pohjoismaisilla ja Itämeren alueen markkinoilla on vaikea arvioida, minkä vuoksi myös tuloksiin sisältyy tältä osin huomattavaa epävarmuutta.

Sähkön ja lämmön tuotanto on maailmanlaajuisesti vielä toistaiseksi tärkein energiaperäistä hiilidioksidia tuottava sektori, ja Suomessakin sen osuus poltto-aineiden polton hiilidioksidipäästöistä on ollut pitkään keskeinen, joten sähkön ja lämmön tuotannon kehityksellä on huomattava rooli etenkin hiilineutraalisuuteen tähtäävissä WAM-ilmastotoimissa, teknisten nielujen hyödyntäminen mukaan lukien. Mallilaskelmien mukainen sähkön kokonaishankinnan kehitys on esitetty

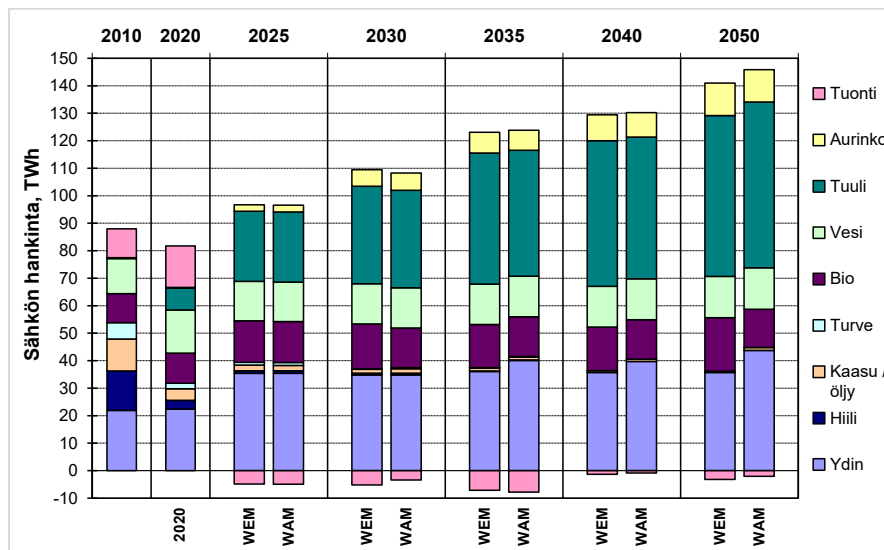


Kuva 14. Uusiutuvan primaarienergian ja kierrätyspolttoaineiden hyödyntämisen kehitys WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050.

energiälähteittäin kuvassa 15, josta voidaan nähdä varsin nopea irtautuminen fossiilisista polttoaineista ja turpeesta jo WEM-skenaariossa.

Vuonna 2010 sähkön kokonaiskulutus oli noin 88 TWh, jonka jälkeen 2011–2021 kulutus on vaihdellut 82 ja 87 TWh:n välillä (Tilastokeskus 2025c), esimerkiksi vuonna 2024 kulutus oli vain 83 TWh. Mallinnetut skenaariot perustuvat tulevaisuuden osalta ilmaston lämpenemistä lukuun ottamatta normaalivuosiin, mikä on huomattava verrattaessa tulevia kulutustasoja vuoteen 2020, jolloin sähkön kulutus laski poikkeuksellisen alas mittaushistorian lämpimimmistä vuodesta ja koronavirusepidemian aiheuttamasta taantumasta johtuen. Talouskasvuoletusten mukaan Suomen kansantalous palautuu kuitenkin 2020-luvun alkupuolen jälkeen nopeasti. Mallinnustulosten mukaan sähkön kokonaiskulutus nousee nopeasti etenevän energiasiirtymän myötä vuonna 2030 jo 100 TWh:n tasolle ja on kummassakin skenaariossa melkein yhtä suuri. Sähkön kulutus ja tuotanto ovat vuonna 2030 lähes tasapainossa ydinvoimalaitosten korkeana pysyvän käyttökertoimen ja nopeasti kasvaneen tuulivoimakapasiteetin ansiosta. Energiatalouden sähköistyminen on jo 2020-luvun loppupuolella tuntuvaa muun muassa liikenteen käyttövoimissa, ja myös uudet datakeskusinvestoinnit lisäävät kulutusta. Sähköistyminen jatkuu tämän jälkeenkin voimakkaana, ja kokonaiskulutus kasvaa vuoteen 2050 mennessä WEM-skenaariossa lähes 140 TWh:iin, WAM-skenaariossa vielä hieman enemmän, noin 145 TWh:n tasolle eli 70 % suuremmaksi kuin 2023.

Sähköntuotannon omavaraisuus paranee tulosten mukaan 2020-luvulla voimakkaasti tuulivoiman, ydinvoiman ja aurinkovoiman tuotannon kasvun myötä. Vuodesta 2025 lähtien Suomi on lievästi sähkön nettoviejä tarkasteluajavälin

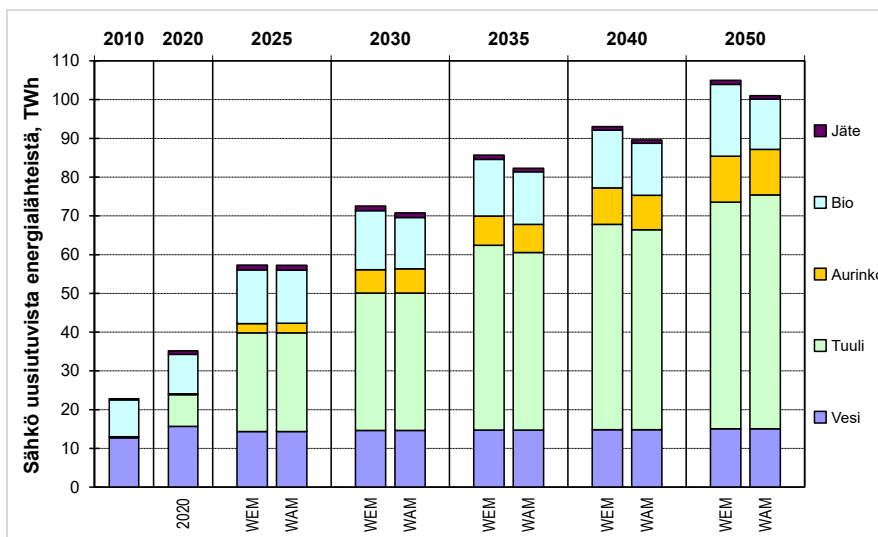


Kuva 15. Sähköenergian kokonaishankinnan kehitys WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050.

loppuun saakka, vaikka vuonna 2040 tase on lähes tasapainossa. WAM-skenaariossa hieman nopeampi energiatalouden sähköistyminen saavutetaan pääsoin ydinvoiman oletetun lisäyksen ansiosta, kun tuuli- ja aurinkovoiman lisäykset pysyvät suunnilleen samana kuin WEM-skenaariossa. Sähkötaseen tasapaino voi tuki 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. Mallinnuksessa oletetut pohjoismaiset tuulivoiman potentiaalit vastaavat JRC:n arvioita (Ruiz Castillo ym. 2019), joiden mukaan lisäinvestointien potentiaalia on muissakin Pohjoismaissa hyvin runsaasti.

Kaikkiaan sähkön tuotanto uusiutuvilla energialähteillä ja jätepolttoaineilla on vuonna 2030 jo suunnilleen kolminkertaistunut vuoteen 2010 verrattuna (kuva 16). Nopeinta kasvu on 2020-luvulla pääosin tuulivoimatuotannon laajenemisen ansiosta, joka jatkuu myös seuraavina vuosikymmeninä. Vuosina 2030–2040 tuulivoiman kasvun rinnalle nousee aurinkosähkön läpimurto. Vesivoiman tuotannossa ei ole otettu huomioon ilmastonmuutoksen mahdollista vaikutusta tuotannoissa olevien vesistöjen valumiin, joten tuotantotaso kasvaa mallinnustuloksissa hyvin maltillisesti lähinnä vanhojen laitosten kunnostuksen kautta.

Biosähkön tuotanto on ollut Suomessa kansainvälisesti poikkeuksellisen merkittävää koko 2000-luvun ajan, sillä sen osuus sähkön kokonaistuotannosta on vaihdellut 11 ja 18 prosentin välillä. Vuoteen 2030 tuotanto kasvaa jonkin verran hieman turpeen ja hiilen käytön alasajon sekä metsäteollisuuden oletetun kasvun myötä. WEM-skenaariossa vuoden 2040 jälkeen päästöoikeuksien hinnan nousu ja ydinvoimalla tuotetun perusvoiman väheneminen johtavat metsäteollisuudessa



Kuva 16. Sähkön tuotanto uusiutuvista energialähteistä ja kierrätyspolttoaineista WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050.

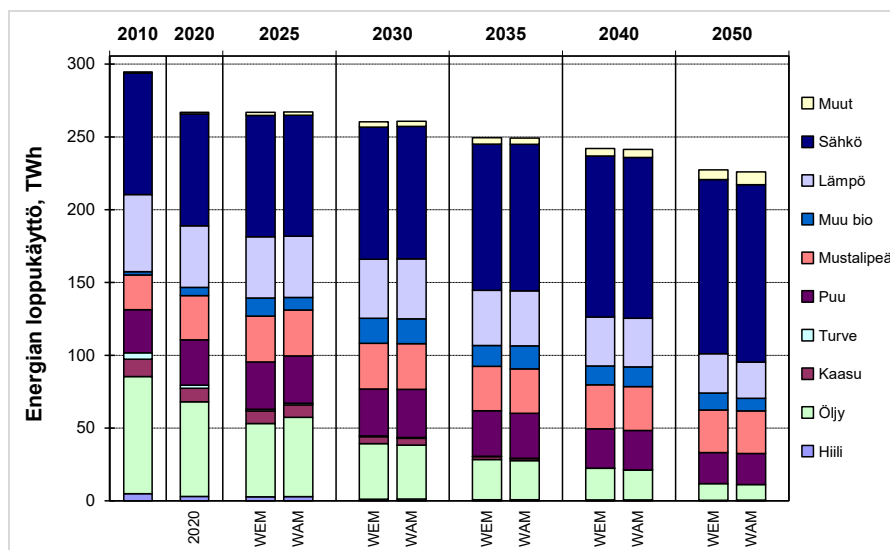
lisäksi investointeihin uuteen tuotantoteknologiaan, mutta WAM-politiikan toimintaympäristössä biosähkön tuotanto jää pienemmäksi, muun muassa lisäydinvoiman ja BECCS-teknologian energiahäviöiden vuoksi.

3.2 Energian kulutus

3.2.1 Loppuenergian kokonaiskulutus

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 2023, Tilastokeskus 2025c). Mallilaskelmien tulosten mukaan loppukäytön kokonaismäärä pysyy WEM-skenaariossa vuoteen 2030 saakka vielä lähellä vuoden 2020 tasoa, mutta kääntyy sen jälkeen jo selvemmin laskusuuntaan (kuva 17). Kokonaiskulutuksen vähentyessä sähkön kulutus kuitenkin kasvaa, eli loppukulutuksen tehostuminen kohdistuu erityisesti polttoaineisiin ja lämpöön, joita samalla korvataan ainakin osittain sähköllä.

IEA:n käytäntöjen mukaisesti esitetyt loppukulutusluvut eivät kuitenkaan määritelmiltään täysin vastaa EU:n energiatehokkuustavoitteen mukaista loppukulutusta, sillä Eurostatista poiketen muun muassa kansainvälisen lento- liikenteen energialähteitä ei IEA:n tilastojen mukaan lueta loppuenergiaan. IEA:n määritelmä poikkeaa myös EU:n uusiutuvan energian direktiivin mukaisesta loppukulutuksesta, jossa ovat mukana lämpöpumppujen kokonaisenergia, voimaloiden omakäyttösähkö ja sähkön siirtohäviöt. Sekä IEA:n että Eurostatin



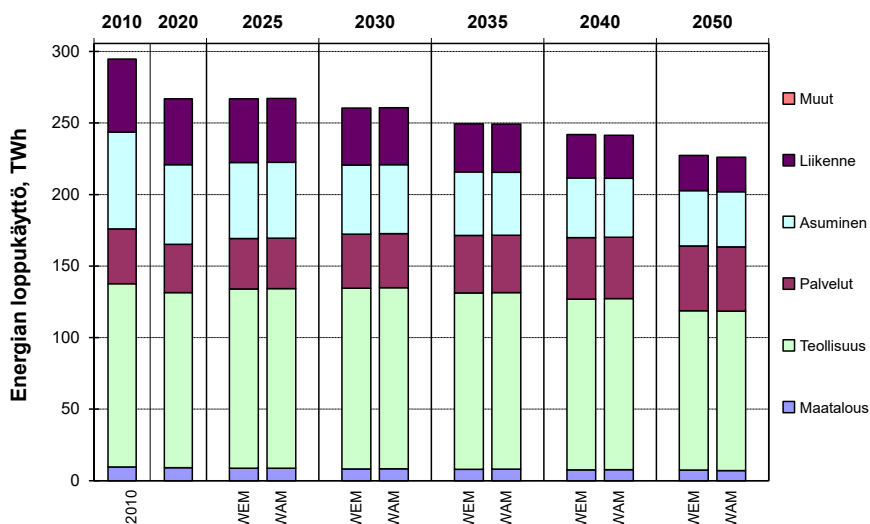
Kuva 17. Energian loppukulutus energialähteittäin WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050 (IEA:n tilastoissa käytetyn määritelmän mukaisesti).

käytäntöjen mukaan teollisuuslaitosten välittömässä yhteydessä, mutta erillisen yhtiön omistuksessa olevien energiantuotantolaitosten prosessilämmön tuotannon polttoaineita ei lasketa teollisuuden loppukulutukseen, vaan ainoastaan niistä tuotettu ja prosesseissa käytetty lämpöenergia.

Vuonna 2030 energian loppukulutus on WEM-skenaariossa yhteensä runsaat 930 PJ (260 TWh) ja WAM-skenaariossa vain hitusen enemmän. Jos myös kansainvälisen lentoliikenteen energiakäyttö lasketaan EU:n energiatehokkuusdirektiivin mukaisesti energian loppukäyttöön, saadaan jonkin verran suurempi lukuarvo. Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportissa (LVM 2018) arvioitiin, että kansainvälisen lentoliikenteen tarpeisiin käytetyn polttoaineen kulutus voisi olla ilman tehostumista 41 PJ vuonna 2030, mutta mallinnuksessa lentokalusto tehostuu ja kulutus asettuu 33 PJ:n tasolle. Näin ollen energia-
tehokkuusdirektiivin laskentasääntöjen mukainen energian loppukulutus olisi kummassakin skenaariossa arviolta noin 270 TWh vuonna 2030.

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

Uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta oli Suomessa EU:n laskentasääntöjen mukaan laskettuna 39 % vuonna 2015 ja 44 % vuonna 2020.



Kuva 18. Energian loppukulutus sektoreittain WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050.

Skenaariotulosten mukaan uusiutuvan energian osuus nousee WEM-skenaariossa varsin tasaisesti ja saavuttaa noin 62 %:n tason vuonna 2030, ja sen jälkeen nousee vuoteen 2050 mennessä noin 75 %:iin. Vuoden 2030 jälkeen uusiutuvan osuus kasvaa hitaammin, koska tiukkenevista ilmastotavoitteista huolimatta uusia politiikkatoimia ei juuri oletettu sen jälkeen liikennettä ja päästökaupan kokonaiskiintiöiden kiristymistä lukuun ottamatta.

Sektorikohtaista energian loppukulutusta tarkasteltaessa merkille pantavaa on erityisesti liikenteen ja asumisen kulutuksen tehostuminen voimakkaasti, kun taas teollisuudessa ja palveluissa hyötyenergian kysynnän kasvu kompensoi tai jopa ylittää tehostumisen aikaansaaman kulutuksen vähentymisen (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 kummassakin skenaariossa vuonna 2030 jo 4,7 TWh:iin ja vuoteen 2050 mennessä yli 13 TWh:iin, missä on otettu huomioon sähköautojen vuotuisten ajokilometrimäärien ja niiden myötä tieliikenteen kokonaissuoritteiden huomattava kasvu ELIISA-mallilla lasketun perusennusteen mukaisesti.

Asumisen ja palvelujen loppukulutuksessa sähköä lukuun ottamatta kaikki muu energian käyttö vähenee lämmityksen ominaiskulutusten putoamisen myötä, joka on huomattavaa sekä uudisrakennuksissa että energiakorjaustoiminnan ansiosta myös vanhassa rakennuskannassa. Oletusten mukaan energiatehokkuus paranee parhaimmillaan lähes 60 % vuoden 2015 tasosta jo WEM-skenaariossa, eikä WAM-skenaariossa voitu olettaa kuin hieman tätä suurempaa tehostumista.

Teollisuudessa keskeisiä vaikutuksia ovat sekä WEM- että WAM-skenaariossa sähköistyminen prosessilämmön tuotannossa ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biopolttoaineilla. Prosessiteollisuudessa sähkön kulutusta merkittävästi lisääviä muutoksia ovat hybridisähköuunien käyttö mineraali-teollisuudessa, masuuniteräksen tuotannosta luopuminen sekä elektrolyyttinen vedyn valmistus petrokemian teollisuudessa.

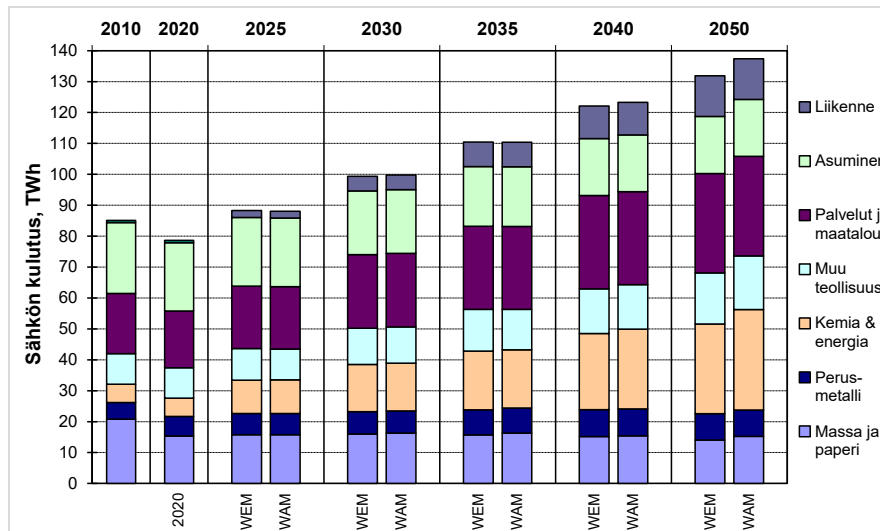
Energian loppukäytön kokonaismäärissä teollisuuden merkitys korostuu Suomessa näiden skenaarioiden tulosten mukaan tulevaisuudessa entisestään, sillä sen kannalta keskeisin tekijä, metsäteollisuuden tuotanto, kasvaa jossain määrin vuoden 2020 tasosta sekä puumassa- että puutavarateollisuuden osalta. Metsäteollisuudessa sähköistymisellä ei ole aivan samassa määrin energian käytön tehostumispotentiaalia kuin monilla muilla sektoreilla, ja tuotannon sivutuotteena syntyvä bioenergia on edullista käyttää hyödyksi energiana. Tulevaisuudessa sivutuotteita voidaan lisääntyvässä määrin käyttää myös esimerkiksi kemianteollisuuden raaka-aineena, mutta tarkastelluissa skenaarioissa hyödyntäminen uusiin tuotteisiin jäi oletusten mukaan vielä melko vähäiseksi. Näitä teollisuuden energian ja biomateriaalien käyttöön vaikuttavia kehityssuuntia ei tässä työssä kuitenkaan voitu analysoida tarkemmin. Aiempien tarkastelujen perusteella uusien tuotteiden merkitys energiataseeseen ja ainespuun tarpeeseen on jäänyt verrattain pieneksi, mutta toimialalla on varsin suuri muutospotentiali.

3.2.2 Sähköenergian kulutus

Sähköenergian kokonaiskulutus (häviöt mukaan lukien) oli vuonna 2010 noin 88 TWh, jonka jälkeen 2011–2021 kulutus on pysytellyt 82 ja 87 TWh:n välillä, eli tilastojen perusteella selvää kulutuksen kasvutrendiä ei ole ilmennyt vuoden 2007 jälkeen. Tarkastelluissa skenaarioissa sähkön kokonaiskulutus alkaa 2020-luvun loppupuolelta alkaen kasvaa melko nopeasti ja saavuttaa jo vuoteen 2030 mennessä 100 TWh:n tason sekä WEM- että WAM-skenaariossa.

Sähkön loppukulutukseen lasketaan kansainvälisen tilastokäytännön mukaan vain loppukäyttösektorien kulutus, joka oli esimerkiksi vuonna 2020 vain 77 TWh. Kuvassa 19 on kuitenkin esitetty kokonaiskulutus energiasektori mukaan lukien (mutta siirtohäviöt pois lukien). Tulosten mukaan sähkön kulutus kasvaa erityisesti liikenteessä, palveluissa, kemianteollisuudessa ja energiasektorilla. Kotitalouksien sähkön loppukulutus pysyy tulosten mukaan vuoteen 2030 saakka suunnilleen nykytasolla, mutta vähenee sen jälkeen runsaat 10 % vuoteen 2050 mennessä. Rakennusten lämmityksessä sähkön osuus ostoenergiasta kasvaa, ja samalla lämmityksen energiankulutus vähenee sekä lämmitysjärjestelmien kehityksen että rakennusten energiatehokkuuden paranemisen ansiosta. Palvelusektorilla kehitys on lämmityksen osalta samankaltainen, mutta tulosten mukaan palvelujen muu kulutus, erityisesti ICT-kulutus, jatkaa kasvua. Datakeskusten sähkön kokonaiskulutus nousee lähtöoletusten mukaan vuoteen 2050 mennessä noin 10 TWh:n tasolle, josta saadaan huomattava määrä hyödynnettävissä olevaa hukkalämpöä.

Suhteellinen kulutuksen kasvu on kuitenkin suurinta liikenteen sektorilla, jossa loppukulutus nousee yli 12 TWh:n vuoteen 2050 mennessä. Myös kemian-



Kuva 19. Sähköenergian loppukulutus sektoreittain WEM- ja WAM-skenaariossa.

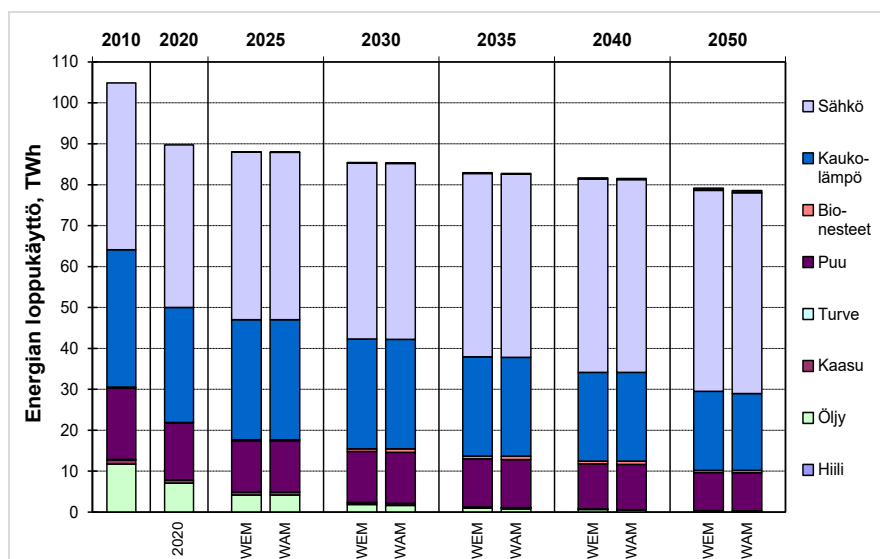
teollisuudessa ja energiateollisuudessa sähkön kulutus kasvaa voimakkaasti, jälkimmäisessä pääosin uusien polttoaineiden jalostus- ja varastointiteknologian käyttöönoton (muun muassa vedyn tuotanto ja Power-to-X- teknologiat) sekä lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden laajenevan hyödyntämisen myötä. Näihin tekniikoihin onkin viime vuosina alettu investoimaan aiempaa merkittävämmiin kaukolämpösektorin energiamurroksen osana.

3.2.3 Asuminen ja palvelut

Asumisen ja palveluiden energian loppukulutus laskee tulosten mukaan huomattavasti vuoteen 2050 mennessä (Kuva 20), vaikka kulutuksen merkittävin ajuri, asuin- ja palvelurakennuskanta, kasvaa. Vähennykseen vaikuttavina tekijöinä ovat uudisrakentamisen ja rakennuskannan varsin maltillinen kehitys-arvio, korjausrakentamisella saavutettava energiatehokkuuden paraneminen, lämmitystapamuutokset sekä uudisrakentamisen energiatehokkuusvaatimusten tiukentuminen.

Rakennuskannan kehitystä koskevat oletukset pidettiin samoina WEM- ja WAM- skenaariossa, ja ominaiskulutusten kehitysarviot olivat WEM-skenaariossa samoja kuin PM Sanna Marinin hallituskautena laaditussa VN TEAS HIISI-hankkeen WAM-skenaariossa (Koljonen ym. 2021).

KEITO-hankkeen WAM-skenaariossa uusien rakennusten energiatehokkuuden oletettiin paranevan vielä hitusen nopeammin. Menneen kehityksen osalta on muistettava, että vuosi 2010 oli poikkeuksellisen kylmä vuosi ja 2020 puolestaan ennätyslämmin. Skenaarioissa on otettu huomioon lämmitystarpeen asteittainen



Kuva 20. Asumisen ja palveluiden energian loppukulutus WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050.

vähentäminen ilmaston lämpenemisen myötä. Lämpöpumppujen yleistyessä rakennusten lämmityksen energialähteissä sähkön merkitys korostuu huomattavasti vuoteen 2050 mennessä, ja fossiilisiin polttoaineisiin perustuva erillislämmitys väistyy lähes kokonaan. Myös kaukolämmön kulutus supistuu tuntuvasti, mutta sen markkinaosuus asutuskeskusten lämmityksessä säilyy silti korkeana.

Vanhojen rakennusten ominaiskulutusten oletetut muutokset ovat pääosin samat kuin Suomen pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategiassa (Ympäristöministeriö, 2020). Arvioituissa hyötyenergian ominaiskulutuksen muutoksissa on otettu huomioon lämmitystapamuutoksilla, korjauksilla ja kunnossapidolla saatava energiatehokkuuden parannus sekä ilmastonmuutoksesta johtuva lämmitystarpeen vähentyminen. Korjausten vaikuttavuudessa on otettu huomioon korjausrakentamisen energiatehokkuusvaatimusten kiristyminen sekä 2020-luvun alkupuolella energiatehokkuuden parannuksiin ja erillislämmityksen muutoksiin osoitetut tuet.

Uudisrakennusten osalta lähtökohtana olivat energiatodistusrekisteristä poimittujen, vuoden 2020 tai sen jälkeen valmistuviksi ilmoitettujen uudisrakennusten lämmitysenergian kulutus, sekä ilmaston lämpeneminen. Uusien rakennusten energiatehokkuusvaatimusten kiristyminen vähentää ominaiskulutusta. Rakennusten jäähdytyksen tarve puolestaan kasvaa, erityisesti palvelurakennuksissa, mutta sen vaikutus ei yllä lämmitystarpeen laskun tasolle.

Lämmityksen ja käyttöveden lisäksi asumisen ja palveluiden energiankulutukseen sisältyy runsaasti valaistus- ja laitesähköä, jäähdytysenergiaa (sähkö, kaukokylmä) sekä jonkin verran polttoaineita lähinnä työkoneiden käyttöön, ja ne ovat mukana oheisessa kuvassa 21. Näistä ainoastaan työkoneiden polttoaineet aiheuttavat huomattavia suoria KHK-päästöjä, ja niitä käsitellään jäljempänä yhdessä muiden työkoneiden kanssa.

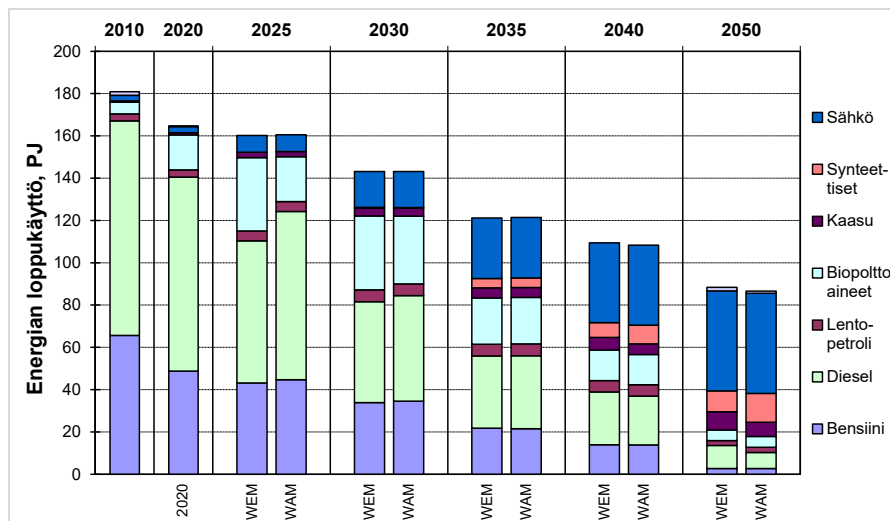
3.2.4 Kotimaanliikenteen energia

Liikenteen osalta sekä WEM- että WAM-skenaario perustuu VTT:n vuonna 2024 ELIISA-mallilla päivittämään perusennusteeseen, joka puolestaan pohjautuu pääosin Traficomien vuonna 2024 julkaiseman ennusteeseen mutta jossa suoritteet kasvavat kuitenkin hieman tätä suuremmiksi. Vuonna 2030 täyssähköautoja ja lataushybridejä on WEM-perusoletusten mukaan jo yli 900 000, ja vuonna 2050 noin 88 % henkilöautoista on oletusten mukaan täyssähköautoja. Voimakas sähköistyminen näkyy suoraan liikenteessä kulutetun kokonaisenergian vähentymisenä (kuva 21). Henkilöautojen kokonaisliikennesuorite kasvaa kummassakin skenaariossa ELIISA-mallilaskelmien mukaisesti siten, että vuonna 2050 kokonaisvuosisuorite on noin 45 % vuoden 2023 tasoa suurempi.

Liikenteen ELIISA-laskelmien WEM- ja WAM-oletusten mukaan bensiinin ja dieselin jakeluvelvoitetta nostetaan vuoteen 2030 mennessä 30 prosenttiin, eikä velvoitetta nosteta enää tämän jälkeen. Kun lisäksi akkujen julkisen latauksen uusiutuva osuus on tulossa osaksi jakeluvelvoitteita, bionesteiden osuus rajattiin myös WAM-skenaarion TIMES-mallinnuksessa noin 30 %:iin tarkasteluajavälin loppuun eli vuoteen 2055 saakka. Biokaasun käytön lisäys kasvattaa bio-osuuden kuitenkin noin 35 %:iin jo vuonna 2030. Biopolttoaineet ja sähköistymisen oletettu voimistuminen vähentävät polttomoottoriajoneuvojen KHK-päästöjä siinä määrin, että ilman polttonesteiden sekoiteosuuden kasvuakin skenaariossa saavutetaan suunnilleen kotimaanliikenteen päästöjen vähennystavoitteet (50 %:n vähennys vuonna 2030 vuoteen 2005 verrattuna). Nykyisten politiikkatoimien avulla saavutettaviksi oletetut muutokset ajoneuvokannassa perustuvatkin osittain fossiilitoman liikenteen tiekartan (LVM 2020, 2021) tavoitteisiin.

Keskeisimmät WEM-skenaarion oletukset koskivat sähköhenkilöautojen määrää autokannassa (0,93 milj. vuonna 2030; 3,0 milj. vuonna 2050), kaasukäyttöisten ajoneuvojen määriä (henkilöautoja vähintään 15 000, kuorma-autoja vähintään 2 200 vuonna 2030 ja 8 000 vuonna 2050) sekä kaasun kokonaiskäytön määrää tieliikenteessä (vuonna 2030 vähintään 1 TWh, josta biokaasua lähes 100 %, vuonna 2050 vähintään 2,4 TWh). WAM-oletukset poikkesivat vain vähän WEM-oletuksista, pääosin sähköajoneuvojen hieman nopeampana kasvuna.

Vielä vuonna 2018 kotimaanliikenteen loppuenergian kulutus oli noin 180 PJ, mutta on kääntynyt sen jälkeen laskuun. Skenaariotulosten mukaan lasku jatkuu siten, että vuonna 2030 se on noin 21 % pienempi ja vuonna 2040 jo noin 40 % pienempi kuin vuonna 2018 (kuva 21). Energiankulutuksen väheneminen on suurelta osin sähköistymisen ansiota, mutta myös hybridiajoneuvot sekä



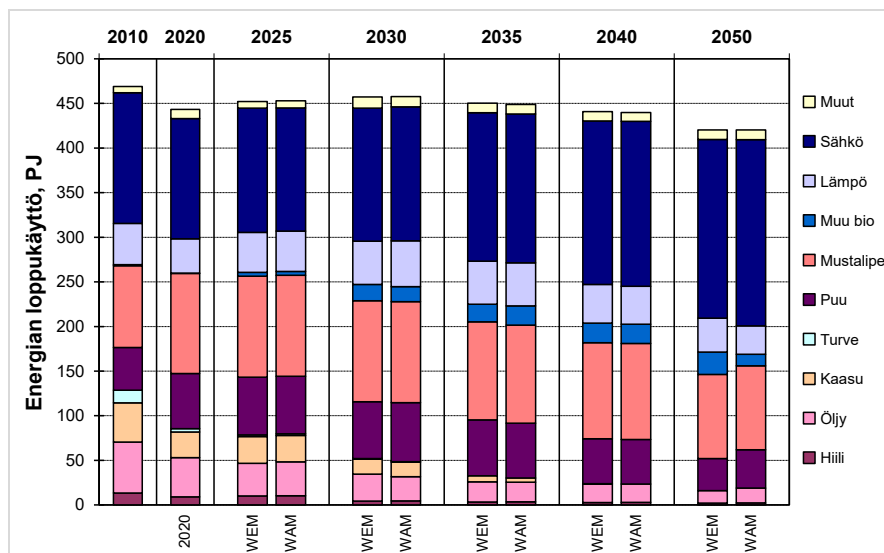
Kuva 21. Kotimaanliikenteen loppuenergian kulutus WEM- ja WAM-skenaariossa vuoteen 2050.

raskaassa liikenteessä vuodesta 2035 alkaen vetyajoneuvot parantavat tieliikenteen energiatehokkuutta. WAM-skenaariossa kulutus vähenee 2035 jälkeen hieman nopeammin raskaiden vety- tai polttokennoajoneuvojen suuremman markkinaosuuden ansiosta. Vuonna 2050 polttokennokuorma-autoja ja -rekkoja olisi liikenteessä noin 8500 kappaletta, eli jo enemmän kuin kaasurekkoja, ja polttokennokäyttöisiä henkilö- ja pakettiautoja käytössä noin 100 000 kappaletta.

Lentoliikenteessä lyhyillä reiteillä sähkölentokoneet ja pitkillä reiteillä sähköpolttoaineita käyttövoimanaan käyttävät koneet tulevat kaupalliseen käyttöön tulosten mukaan vuodesta 2040 alkaen, mikä voisi toteutua lentoliikenteen kiristyvän päästökaupan ja uuden teknologian nopean kehityksen ansiosta. Kotimaan lentoliikenteen hiilidioksidipäästöt eivät kuitenkaan kuulu kasvihuonekaasuinventaariorissa taakanjakosektorille, vaan niitä koskee erityinen lentoliikenteen päästökauppamekanismi. Sähkölaitteita erityisesti ammoniakkin, vedyn ja metanolin laajaan käyttöönottoon lentoliikenteessä liittyy toisaalta myös monia epävarmuustekijöitä.

3.2.5 Teollisuuden loppuenergia

Energian loppukulutuksen kannalta ylivoimaisesti merkittävin pääsektori on Suomessa teollisuus. Sen osuus loppuenergian kokonaiskulutuksesta oli vuonna 2020 noin 46 % (IEA 2023). Toisin kuin sähkön kokonaiskulutuksen osalta yllä, tässä kohdin ei käsitellä energiateollisuuden kulutusta, vaan vain valmistavan tehdasteollisuuden, kaivannaisteollisuuden ja rakennustoiminnan energian kulutusta. On huomattava, että esimerkiksi terästeollisuuden masuunien pelkistin-



Kuva 22. Teollisuuden energian loppukulutus WEM- ja WAM-skenaariossa.

polttoaineiden syöttö tai öljynjalostuksen prosessipolttoaineet eivät sisälly teollisuuden energian kulutukseen, vaan valtaosin energiateollisuuteen.

Teollisuuden kokonaiskulutuksessa ei WEM- skenaariossa tapahdu merkittäviä muutoksia tarkasteluajana, mutta kulutus sentään kääntyy lievään laskuun vuoden 2030 jälkeen (Kuva 22). Teollisuustuotannon kasvun vaikutus toisin sanoen kompensoituu energiatehokkuuden parantumisella, jota erityisesti sähköistyminen edistää. Sähköistymistä tapahtuu kaikilla teollisuuden sektoreilla, mutta esimerkiksi lämpöpumppujen potentiaali polttoaineisiin perustuvan prosessihöyryn tuotannon korvaajana on teknisesti rajallinen, jonka vuoksi niiden avulla ei saada kovin suuria tehokkuusparannuksia. Ja kuten edellä huomautettiin, myöskään masuunien korvaaminen uusilla prosesseilla, jonka oletettiin tapahtuvan vuoteen 2040 mennessä, ei vaikuta merkittävästi teollisuuden loppuenergian käyttöön.

Uusiutuvista energialähteistä määrällisesti eniten kasvaa puuperäisen bio-energian käyttö, ja lisäys kohdistuu voimakkaimmin metsäteollisuuden jäteliemiin ja sivutuotteisiin, ja vain vähäisessä määrin metsähakkeeseen. Näiden rinnalle nousee vuodesta 2030 alkaen vähitellen kasvava muun bioenergian käyttö, johon sisältyy muun muassa biokaasua, biometaania, bioöljyjä ja sähkömetaania. Kumpikin päästökauppamekanismi (ETS1 ja ETS2) parantaa sekä sähköistymisen että bio- ja synteettisten polttoaineiden kilpailukykyä teollisessa energiankäytössä.

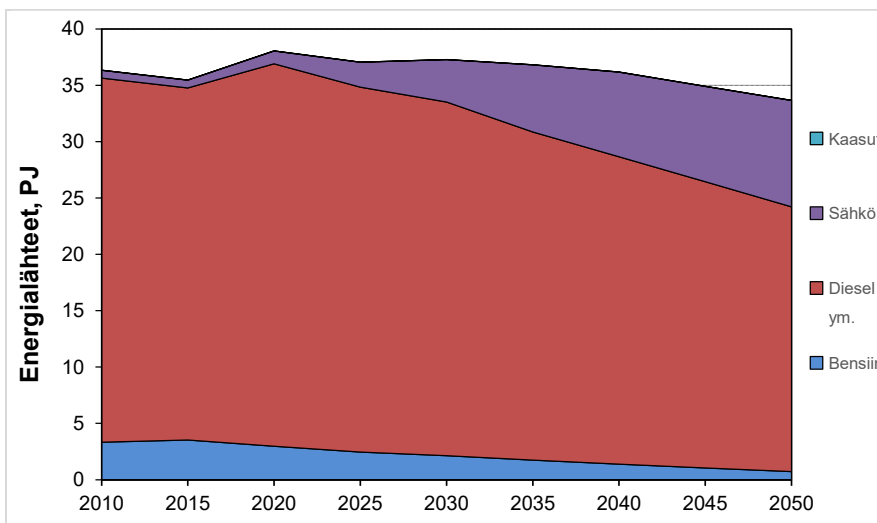
Keskeisiä vaikutuksia sekä WEM- että WAM-skenaariossa ovat sähköistyminen teollisuuden prosesseissa ja prosessilämmön tuotannossa ja fossiilisten polttoaineiden korvautuminen biopolttoaineilla. Prosessiteollisuudessa sähkön kulutusta lisääviä muutoksia ovat muun muassa hybridisähköuunien käyttö mineraaliteollisuudessa ja vastaavat uudet prosessit perusmetallin ja kemian teollisuudessa. Kemianteollisuudessa ja metalliteollisuudessa sähkön käyttö kasvaa myös sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen myötä. Rakennustoiminnassa työkoneiden on oletettu voivan sähköistyä huomattavasti vuoteen 2050 mennessä (josta lisää jäljempänä).

3.2.6 Muu energiankulutus

Taakanjakosektoreilla maa- ja metsätalouden, kalastuksen, rakennustoiminnan, kaivostoiminnan ja muiden työkoneiden polttoainekäytöstä aiheutuu huomattavat kasvihuonekaasujen päästöt. Näiden sektorien energiankulutus on nykyisin valtaosin työkoneiden moottoripolttoöljyjä. Esimerkiksi vuonna 2017 maatalous-rakennusten lämmitykseen ja viljankuivaukseen kului lämmitysöljyä noin 1,1 TWh, maatalouden työkoneisiin noin 3,8 TWh, rakennustoiminnan työkoneisiin noin 4 TWh ja muihin työkoneisiin noin 2 TWh, sekä kalastusaluksiin 0,4 TWh. Polttoaineiden kulutuksen aiheuttamat hiilidioksidin kokonaispäästöt ovat olleet näillä sektoreilla yhteensä lähes 3 Mt:n tasolla. Työkoneiden energialähteiden kokonaiskäytön ja sähköistymisen kehitys on WEM-skenaariossa osalta esitetty kuvassa 23. Sähkötyökoneiden nykyisistä markkinaosuuksista tai kehitysarvioista ei ollut käytettävissä luotettavia arvioita, esimerkiksi VTT:n TYKO-mallista, jossa on kuvattuna ainoastaan työkoneiden polttoainekäyttö.

Työkoneiden päästöt käsittävät monenlaisten ajettavien ja siirrettävien työkoneiden dieselöljyn ja bensiinin kulutuksen aiheuttamat päästöt. Koneista suurin osa sijoittuu maa- ja metsätalouteen sekä rakennustoiminnan sektoreille, joista sähköistymisen oletettiin saavan sijaa nopeimmin rakennustoiminnassa ja kaivannaisteollisuudessa. WEM- skenaarioiden mallilaskelmissa sekä maa- ja metsätalouden että rakennustoiminnan työkonekäytön kysynnän oletettiin kehittyvän näiden sektorien tuotannon volyymien kehitykseen sidottujen muutoskertoimien mukaan. Maatalouskoneiden osalta mallinnuksessa otettiin lisäksi erikseen huomioon energiatehokkuuden paraneminen moottori- ja voimansiirtotekniikan tavanomaisen kehityksen myötä, sekä vähintään maltillinen sähköistyminen, joka painottuu rakennustoiminnan, kaivostoiminnan ja palveluiden työkoneisiin. WAM-skenaariossa laskentamallin annettiin kuitenkin investoida jonkin verran nopeampaan sähköistymiseen, ottaen huomioon skenaariossa oletetut suuremmat energiasektorin investoinnit lisäsähköistymistä tukevin.

Työkoneille oletettiin skenaariossa polttoöljyn jakeluvelvoite, joka nousee WEM-skenaariossa lain mukaisesti 10 %:iin ja WAM-skenaariossa oletetun politiikkatoimen myötä 30 %:iin vuoteen 2030 mennessä. ETS2-mekanismin piirissä biopolttoaineiden osuus voi mallissa kasvaa kuitenkin siinä määrin kuin nouseva ETS2-hinta parantaa niiden kilpailukykyä. Maa- ja metsätalous kuten kalastusaluksetkin oli kuitenkin rajattu mallinnuksessa ETS2:n ulkopuolelle (ks. luku 2.1), ja kalastusalukset myös jakeluvelvoitteen ulkopuolelle, joten näissä käyttökohteissa politiikkatoimien vaikutukset jäävät vähäisemmiksi. Maatalouden työkoneissa oli mallinnettu mahdollisuus myös biokaasukoneiden käyttöönottoon, mutta tuloksissa niiden merkitys jäi hyvin vähäiseksi. Työkoneiden kokonaispäästötulokset on esitetty jäljempänä myös taulukossa 13.



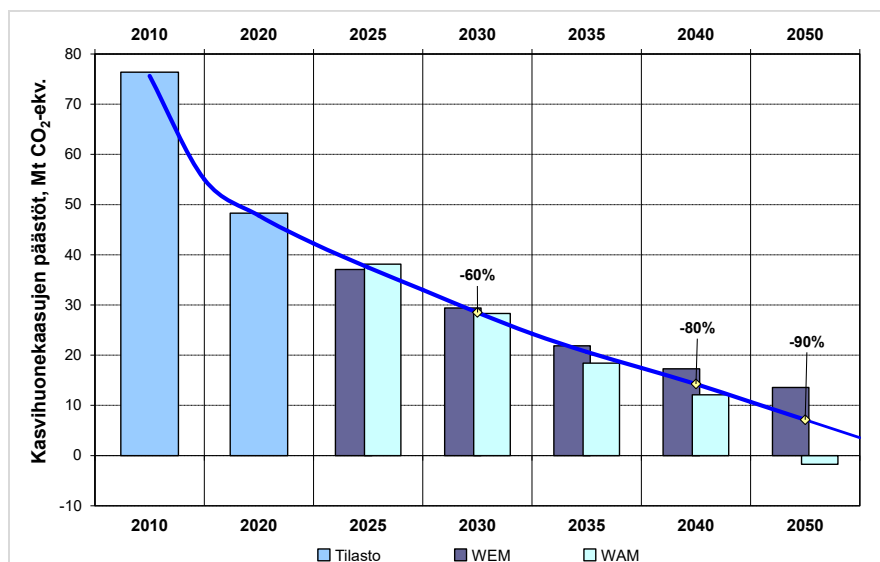
Kuva 23. Työkoneiden energialähteiden kehitys WEM-skenaariossa. WAM-skenaariossa kehitys poikkeaa tästä vain hieman suuremmin sähköistymisin.

3.3 Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys

3.3.1 Päästöjen kokonaistaseen kehitys

Vuonna 2022 voimaan tulleen uudistetun ilmastolain mukaan Suomen kansallinen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen (LULUCF pois lukien) vähennystavoite on 60 % vuoteen 2030 mennessä, 80 % vuoteen 2040 mennessä ja 90 % vuoteen 2050 mennessä, vuoden 1990 tasoon verrattuna. Tarkastellussa WEM-skenaariossa saavutetaan 59 %:n vähennys ja WAM-skenaariossa 60 %:n vähennys (kuva 24). Ilmastolain tavoite vuodelle 2030 voidaan siis tulosten mukaan suurella todennäköisyydellä saavuttaa nykyisellä politiikalla tai vain vähäisin lisätoimin, mikäli mallinnuksen mukaiset investoinnit toteutuvat. Sen sijaan vuosien 2040 ja 2050 tavoitteita ei tulosten mukaan saavuteta nykyisin politiikkatoimin, vaan tarvitaan lisätoimia. WEM-skenaariossa saavutetun päästötason ja tavoitteen erotus (päästökuilu) on vuonna 2040 noin 3,0 Mt CO₂-ekv. ja vuonna 2050 noin 6,4 Mt.

Ilmastolakiin on kirjattu lisäksi niin sanottu hiilineutraalisuustavoite, joka koskee kansallisia nettopäästöjä maankäytön ja hiilivarastojen muutosten aikaansaamat nieluvaikutukset huomioon otettuna (ns. LULUCF-päästöluokka). Nettopäästöjen tulisi hiilineutraalisuustavoitteen mukaan olla suunnilleen nollassa vuonna 2035 ja pian sen jälkeen nettopäästöjen tulisi laskea vakaasti negatiivisiksi. Tavoitteen saavuttaminen edellyttäisi tulosten valossa huomattavia nettohiililähtöjä vuonna 2035 LULUCF-päästöluokassa, siten että niiden tarve olisi WEM-



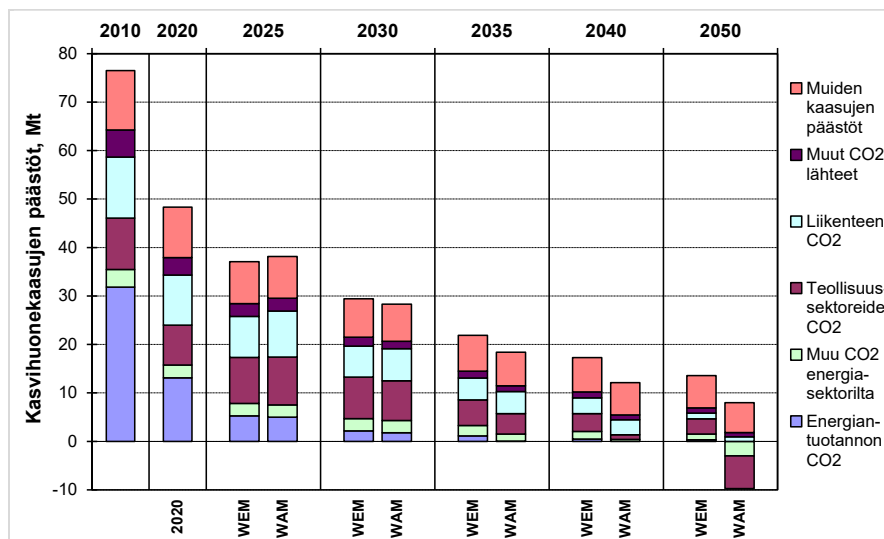
Kuva 24. Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen kehitys WEM- ja WAM-skenaariossa 2000–2055 (Mt CO₂-ekv., GWP=AR5).

skenaariossa noin 22 Mt ja WAM-skenaariossa noin 18,5 Mt. Uusimpiin LULUCF-taselaskelmiin nähden nielujen lisätarve on siis merkittävä (ks. luku 5).

Kasvihuonekaasupäästöjen pääluokkien mukainen jaottelu (kuva 25) osoittaa, että vuoteen 2030 saakka päästönvähennykset painottuvat suurelta osin energiantuotannon sektoreille, sähkön ja lämmön tuotantoon sekä öljynjalostukseen, joissa tehokkaana ohjaustekijänä on päästökauppa ja siinä määräytyvä päästöoikeuksien hinta. Taakanjakosektoreista liikenteessä saavutetaan tulosten mukaan niin ikään merkittävä päästöjen vähennys jo vuoteen 2030 mennessä.

Tuntuja suhteellisia vähennyksiä saadaan näiden lisäksi myös rakennusten erillislämmityksessä, jossa energiaverotus, biopolttoaineiden jakeluvelvoite ja ETS2-mekanismi ovat ohjaavina tekijöinä, sekä F-kaasupäästöissä, joiden kehitys on arvioitu Syke:ssä ja joiden vähennyksiin ohjaavat EU-tason haitallisten aineiden käyttörajoitukset ja standardit. Skenaarioissa oletetut muutokset prosessiteollisuudessa tuovat 2030 mennessä melko vähän päästöjen lisävähennyksiä, ja merkittävämmiin vasta 2040. Sekä työkaluiden että lämmityksen irtautumista fossiilisista polttoaineista vauhdittaa vuodesta 2030 alkaen ETS2-päästökauppamekanismi.

Vuoteen 2050 mennessä erot WEM- ja WAM-skenaarioiden välillä kasvavat. Päästöjen vähennykset kohdistuvat WEM-skenaariossa vuoden 2030 jälkeen valtaosin teollisuuteen ja liikenteeseen, mutta pieniä lisävähennyksiä saadaan kaikilta muiltakin sektoreilta, maatalous ja jätehuolto mukaan lukien. WAM-skenaariossa lisävähennyksiä kohdistuu CCS:n käyttöönoton ansiosta tuntuvasti myös energiasektorille, vaikka suurin osa siitä on teollisuuslaitosten yhteydessä.



Kuva 25. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys pääluokittain WEM- ja WAM-skenaariossa 2010–2050 (Mt CO₂-ekv., GWP=AR5).

Taulukko 12. Kasvihuonekaasupäästöjen tase (pl. LULUCF) vuosina 2010–2055 pääluokittain (liitteessä G taulukot hieman tarkemmalla luokituksella).

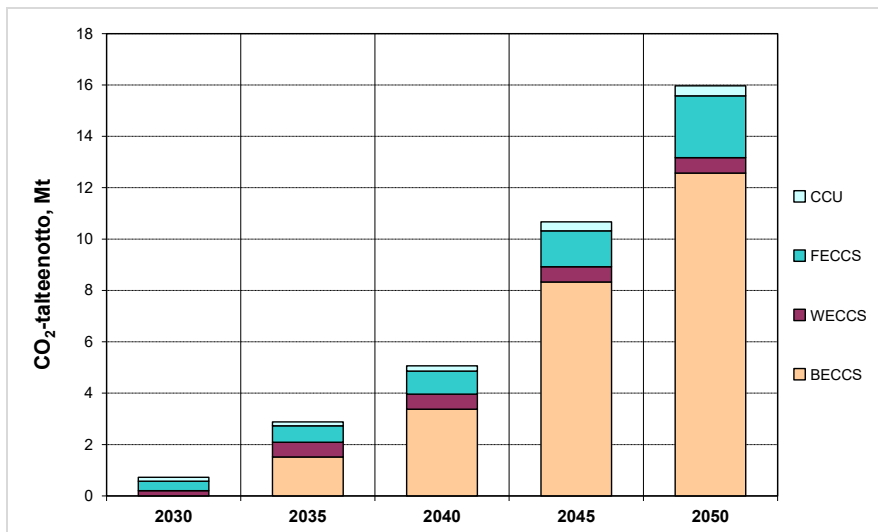
Gg(CO ₂ -ekv.)				WEM-skenaario						
Päästöluokka	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
1A Polttoaineiden polton päästöt	60.09	40.52	34.30	24.32	17.34	12.41	8.69	7.01	5.20	3.75
1A1 Energiateollisuus	30.94	17.75	13.08	7.09	4.94	3.57	1.89	1.77	1.56	1.12
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10.25	6.74	6.27	5.38	3.59	2.51	2.04	1.68	1.28	1.24
1A3 Kotimaan liikenne	12.71	10.85	10.44	8.56	6.49	4.60	3.33	2.30	1.23	0.36
1A4 Muut sektorit	4.98	4.21	3.79	2.72	1.90	1.50	1.26	1.14	1.06	0.96
1A5 Muu polttoainekäyttö	1.20	0.97	0.72	0.57	0.43	0.23	0.17	0.12	0.07	0.07
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	0.14	0.15	0.10	0.07	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6.09	5.64	5.03	5.20	5.11	2.87	2.11	2.10	2.09	2.16
3 Maatalous	6.42	6.39	6.42	5.87	5.62	5.47	5.51	5.52	5.52	5.54
5 Jätteiden käsittely	2.84	2.31	1.92	1.48	1.25	1.04	0.90	0.78	0.70	0.66
Epäsuorat CO ₂ päästöt	0.07	0.06	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Yhteensä pl. LULUCF-sektori	75.64	55.07	47.83	37.00	29.43	21.88	17.28	15.48	13.57	12.17

Gg(CO ₂ -ekv.)				WAM-skenaario						
Päästöluokka	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
1A Polttoaineiden polton päästöt	60.09	40.52	34.30	25.70	16.70	9.44	4.06	-2.96	-9.23	-10.95
1A1 Energiateollisuus	30.94	17.75	13.08	7.30	4.76	2.20	0.29	-2.38	-6.23	-7.51
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10.25	6.74	6.27	5.51	3.22	1.16	-0.60	-3.64	-4.88	-4.98
1A3 Kotimaan liikenne	12.71	10.85	10.44	9.59	6.70	4.61	3.18	2.02	0.99	0.42
1A4 Muut sektorit	4.98	4.21	3.79	2.73	1.63	1.25	1.04	0.94	0.87	1.12
1A5 Muu polttoainekäyttö	1.20	0.97	0.72	0.58	0.39	0.21	0.15	0.09	0.01	0.01
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	0.14	0.15	0.10	0.07	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6.09	5.64	5.03	5.02	4.82	2.76	1.94	1.85	1.62	1.66
3 Maatalous	6.42	6.39	6.42	5.82	5.43	5.14	5.13	5.13	5.11	5.14
5 Jätteiden käsittely	2.84	2.31	1.92	1.48	1.25	1.04	0.90	0.78	0.70	0.66
Epäsuorat CO ₂ päästöt	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Yhteensä pl. LULUCF-sektori	75.64	55.07	47.83	38.15	28.31	18.47	12.10	4.87	-1.73	-3.42

Päästöjen kehitys päästöinventaarion pääluokittain on esitetty taulukossa 12. Tuloksista nähdään, että vuonna 2050 polttoaineiden polton kokonaispäästöt ovat WEM-skenaariossa enää noin 5 Mt CO₂ -ekv., ja niiden rinnalla päästöiltään suurin luokka on maatalous. Maatalous jääkin tällöin jo suurimmaksi päästöluokaksi.

WAM-skenaariossa päästöjen lisävähennykset painottuvat vuoden 2030 jälkeen vahvasti hiilidioksidin talteenottoon energiasektorilla ja metsäteollisuudessa (KuvaKuva 26). Skenaariossa on muun muassa oletettu Vantaan jätevoimalan CCS-investoinnin toteutuminen, ja BECCS-investointeja olevan toteutettavissa pääosin metsäteollisuuden tuotantolaitosten yhteydessä yhteensä enimmillään noin 13 Mt vuoteen 2050 mennessä. Tulosten mukaan laajat investoinnit olisivat kannattavia.

Maatalouden rinnalla syvien päästönvähennysten kannalta hankala luokka on teollisuusprosessit, joista keskeisimpiin kuuluvat öljynjalostuksen, petrokemian ja kemian perusteollisuuden prosessit, perusmetallien tuotanto sekä sementin tuotanto. Nämä ovat melko päästöintensiivisiä teollisuudenaloja, joissa uusien prosessien ja korvaavien materiaalien läpimurto saattaa olla aikaa vievää ja joiden mahdollista teknologista kehitystä olisi hyvä mallintaa tarkemmin, mikäli syviin päästönvähennyksiin tähtäävää politiikkaa, kuten hyvin korkealle nousevia



Kuva 26. Hiilidioksidin talteenoton kehitys WAM-skenaariossa 2030–2050.

päästöoikeuksien hintoja, on tarvetta analysoida aiempaa perusteellisemmin. Mallinnetussa WAM-skenaariossa teollisuusprosessien päästöjä on oletettu voitavan vähentää CCS:llä tapauksissa, joissa talteenoton sisältävästä prosessista on ollut käytettävissä riittävät teknis-taloudelliset arviot. Vuoteen 2035 mennessä fossiilisen CO₂:n talteenottoteknologiaa (FECCS) tulee käyttöön noin 0,6 Mt ja vuoteen 2050 mennessä noin 2,4 Mt (KuvaKuva 26).

3.3.2 Taakanjakosektorin päästöjen kehitys

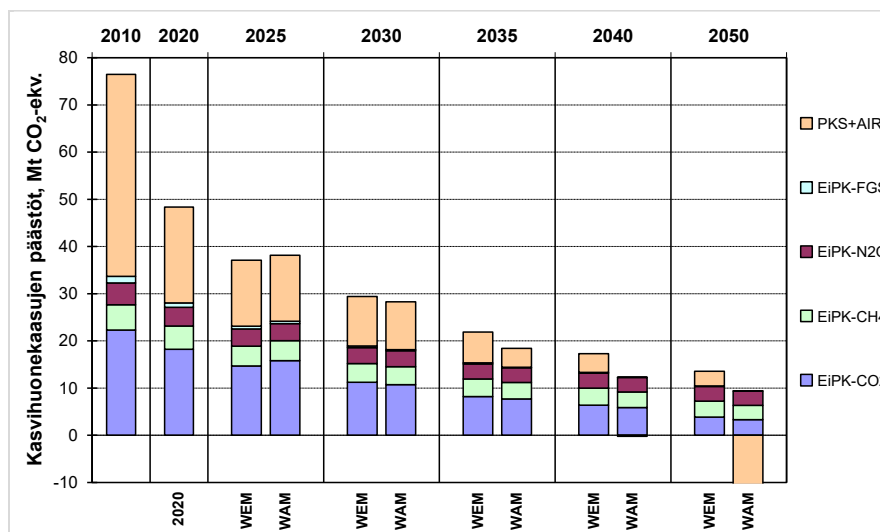
Taakanjakosektorin päästökehitys kuului WEM- ja WAM-skenaarioiden keskeisimpiin keskipitkän aikavälin tarkastelukohteisiin, sillä siihen voidaan erityisesti vaikuttaa kotimaisin politiikkatoimin ja ohjauskeinoin. Kuva 27 havainnollistaa kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen jakaantumista päästökaupparektorin ja taakanjakosektorin päästöihin sekä päästölajeittain. Kuvassa 28 on puolestaan esitetty taakanjakosektorin päästöt vakiintuneella jaottelulla alasektoreihin, ja taulukossa 13 vastaava jaottelu numeroina (kaikissa IPCC-AR5:n GWP-kertoimin). Päästöraportoinnissa on käytetty vielä vuonna 2022 voimassa ollutta taakanjakosektorien rajausta, jonka mukaan mm. jätteenpoltto sisältyy vielä näihin, vaikka itse mallinnuksessa se siirtyi ETS1-päästökauppaan. Tavoiteura huomioi myös menneiden vuosien taakanjakosektorin toteutuneet KHK-päästöt, jotka ovat alittaneet komission määrittämän tavoiteuran ja jotka voidaan hyvittää tulevien vuosien päästötaseessa.

Mallilaskelmien tulosten mukaan taakanjakosektorin hiilidioksidipäästöt alenevat kummassakin skenaariossa verrattain tasaisesti vuodesta 2020 aina vuoteen 2050 saakka. Politiikkatoimien ohjausvaikutus, joka syntyy pääosin

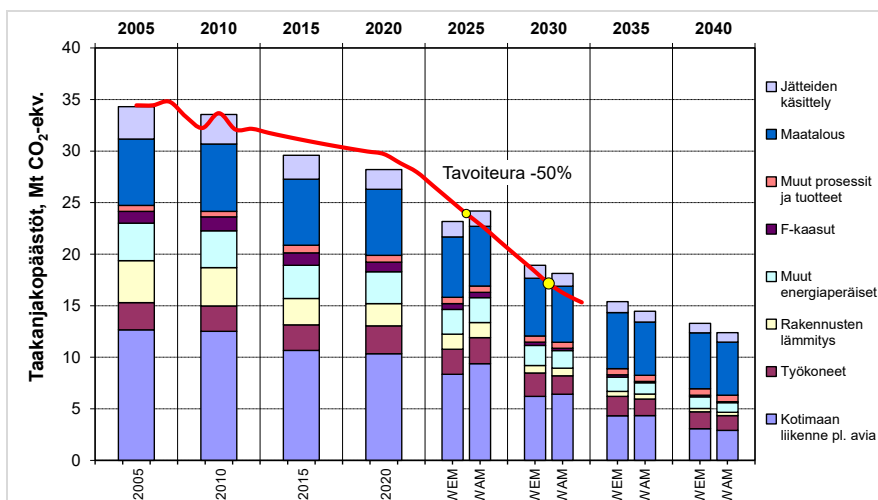
energiaveroista ja jakeluvivoitteista sekä 2030 alkaen näitä vahvasti tukevasta ETS2-mekanismista, näyttää siten pysyvän kohtuullisen hyvänä. Tässä on silti huomattava, että taakanjakosektorin hiilidioksidipäästöistä noin 40 % syntyy nykyisin kotimaanliikenteestä, joten liikenteen vaikutus taakanjakosektorin päästöjen kehitykseen on keskeinen, ja sen osalta keskeiset vaikutukset on arvioitu lähtökohtaisesti ELIISA-sektorimallilla.

Taakanjakosektorin kokonaispäästöt alenevat WEM-skenaariossa vuoteen 2030 mennessä 18,9 Mt:n määrään, joka on 1,8 Mt suurempi kuin taakanjakosektorin 50 %:n vähennystavoite edellyttäisi (vertailuvuosi on 2005). WAM-skenaariossa tavoitteesta jäädään enää 1,0 Mt, mutta viime vuosien tavoiteuran alittaneista päästöistä syntynyt päästösäästö riittänee jo hyvin kompensoimaan tämän eron, jolloin WAM-lisätoimet olisivat riittävät tavoitteen saavuttamiseksi. Taakanjakosektorilla on lisäksi mahdollisuus käyttää EU:n määrittämiä joustoja, joita ei ole huomioitu WEM- ja WAM-arvioissa.

Vuoteen 2005 verrattuna vuoden 2030 päästöt vähenevät eniten kotimaan liikenteessä, jossa vähennys on WEM-skenaariossa 6,5 Mt (51 %), mutta WAM-skenaariossa hieman vähemmän. WAM-skenaariossa vuoden 2025 päästöt hieman kasvavat johtuen pääosin jakeluvivoitteen maltillistamisesta PM Orpon hallituksen päätöksen mukaisesti. Lisäksi liikenteen KHK-päästöjä kasvattaa WAM-skenaarioon mallinnetut muutokset valmisteveroihin (ks liite B). Vuoden 2030 jälkeen päästöjen lisävähennykset ovat skenaarioissa suunnilleen samansuuruiset, mikä johtuu ELIISA-mallissa kummassakin skenaariossa käytetyistä oletuksista markkinaehtoisesta sähköistymisen etenemisestä ja raskaassa liikenteessä niin biokaasun käytön lisäyksestä kuin vetyajoneuvojen



Kuva 27. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys päästökauppa- (ETS1) ja taakanjakosektorilla (EiPK-) päästölajeittain WEM- ja WAM-skenaariossa 2010–2050.



Kuva 28. Kasvihuonekaasupäästöjen kehitys taakanjakosektoreilla WEM- ja WAM-skenaariossa 2005–2040 (Mt CO₂-ekv., GWP=AR5).

kaupallistumisesta. Vuoteen 2050 mennessä liikenteen päästöt WAM-skenaariossa kuitenkin hieman alittavat WEM-skenaariion päästötason.

Liikenteen jälkeen suurimmat päästövähennykset saadaan WEM-skenaariossa aikaan rakennusten lämmityksessä 3,3 Mt ja jätteiden käsittelyssä 1,9 Mt vuonna 2030 vuoteen 2005 verrattuna. Maatalouden päästöjen vähennykset ovat vastaavasti 0,8–1,0 Mt vuoteen 2030 mennessä, mutta vuoteen 2050 mennessä WAM-skenaariossa saavutetaan jo tuntuvammat lisävähennykset. Vuoteen 2040 mennessä maatalouden osuus taakanjakopäästöistä nousee jo yli 40 %:n. Työkoneiden osalta vuoden 2030 vähennys on WEM-skenaariossa vajaat 0,4 Mt vuoden 2005 päästöihin verrattuna, mutta nousee WAM-skenaariossa yli kaksinkertaiseksi pääosin jakeluvelvoitteen tiukennuksen ansiosta. Kuten edellä kuvasta voitiin nähdä, työkoneiden sähköistymisen vaikutus päästöihin jäi verraten maltilliseksi sekä WEM- että WAM-skenaariossa.

Integroidussa TIMES-mallitarkastelussa sektorikohtaiset päästötulokset voivat jonkin verran poiketa sektorikohtaisten mallien ja analyysien tuloksista pääosin juuri sektori-integroinnin vaikutusten kattavamman huomioon ottamisen kautta, mutta nämä eroavuudet eivät ole kokonaisuuden kannalta merkittäviä.

Taulukko 13. Taakanjakosektorin alasektorien kasvihuonekaasupäästöt WEM- ja WAM-skenaariossa vuosina 2005–2040 (Mt CO₂-ekv.).

WEM – Sektorit	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Kotimaan liikenne pl. avia	12.66	12.52	10.67	10.34	8.35	6.21	4.32	3.06
Työkoneet	2.63	2.45	2.48	2.70	2.44	2.26	1.88	1.65
Rakennusten lämmitys	4.07	3.72	2.56	2.16	1.46	0.73	0.49	0.33
Muut energiaperäiset	3.64	3.58	3.21	3.09	2.39	1.94	1.38	1.12
F-kaasut	1.16	1.35	1.22	0.93	0.57	0.33	0.23	0.16
Muut prosessit ja tuotteet	0.57	0.53	0.74	0.66	0.60	0.59	0.60	0.62
Maatalous	6.43	6.53	6.40	6.41	5.86	5.61	5.46	5.51
Jätteiden käsittely	3.14	2.86	2.32	1.92	1.50	1.25	1.05	0.91
Taakanjakosektori yhteensä	34.30	33.54	29.59	28.21	23.17	18.93	15.41	13.36
Päästökauppasektori	35.64	42.11	25.48	19.61	13.83	10.50	6.47	3.92
Kaikki yhteensä	69.94	75.65	55.07	47.83	37.00	29.43	21.88	17.28
WAM – Sektorit	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Kotimaan liikenne pl. avia	12.66	12.52	10.67	10.34	9.37	6.42	4.33	2.91
Työkoneet	2.63	2.45	2.48	2.70	2.53	1.78	1.62	1.43
Rakennusten lämmitys	4.07	3.72	2.56	2.16	1.47	0.74	0.48	0.32
Muut energiaperäiset	3.64	3.58	3.21	3.09	2.41	1.71	1.09	0.93
F-kaasut	1.16	1.35	1.22	0.93	0.52	0.23	0.14	0.09
Muut prosessit ja tuotteet	0.57	0.53	0.74	0.66	0.60	0.59	0.60	0.62
Maatalous	6.43	6.53	6.40	6.41	5.80	5.43	5.16	5.15
Jätteiden käsittely	3.14	2.86	2.32	1.92	1.48	1.25	1.05	0.91
Taakanjakosektori yhteensä	34.30	33.54	29.59	28.21	24.19	18.14	14.47	12.38
Päästökauppasektori	35.64	42.11	25.48	19.61	13.96	10.17	4.00	-0.28
Kaikki yhteensä	69.94	75.65	55.07	47.83	38.15	28.31	18.47	12.10

4 Maankäyttösektorin päästöjen ja poistuminen kehitykset

Markus Haakana, Jukka-Pekka Myllykangas, Tarja Silfver & Sofia Vikfors, Luke

Maankäyttösektori on nettopäästölähde koko tarkastelujakson ajan sekä WEM-että WAM-skenaariossa. WAM-skenaariossa nettopäästöt ovat noin 0,6 Mt CO₂-ekv. pienemmät kuin WEM-skenaariossa vuodesta 2035 lähtien (Taulukko 14. Maankäyttösektorin tulokset WEM- ja WAM-skenaarioissa maankäyttöluokittain. Positiivinen luku on päästö ja negatiivinen poistuma (nielu). Vuosi 2023 vastaa KHK-inventaarion arvoja (Tilastokeskus 2025a)., Kuva 29). Nettopäästöt kasvavat molemmissa skenaarioissa 13,0 miljoonasta hiilidioksidiekvivalenttitonnista vuonna 2025 14,0 miljoonaan hiilidioksidiekvivalenttitonniin vuonna 2030. Vuoteen 2035 mennessä päästöt kasvavat 15,8 miljoonaan hiilidioksidiekvivalenttitonniin WEM-skenaariossa ja 15,2 miljoonaan hiilidioksidiekvivalenttitonniin WAM-skenaariossa. Tämän jälkeen päästöt pienenevät molemmissa skenaariossa ja ovat WEM-skenaariossa 4,5 Mt CO₂-ekv. ja WAM-skenaariossa 3,8 Mt CO₂-ekv. vuonna 2055. On kuitenkin hyvä huomata, että metsämaan ja siten koko maankäyttösektorin tulosten epävarmuus kasvaa mitä pidemmälle tulevaisuuteen sitä tarkastellaan.

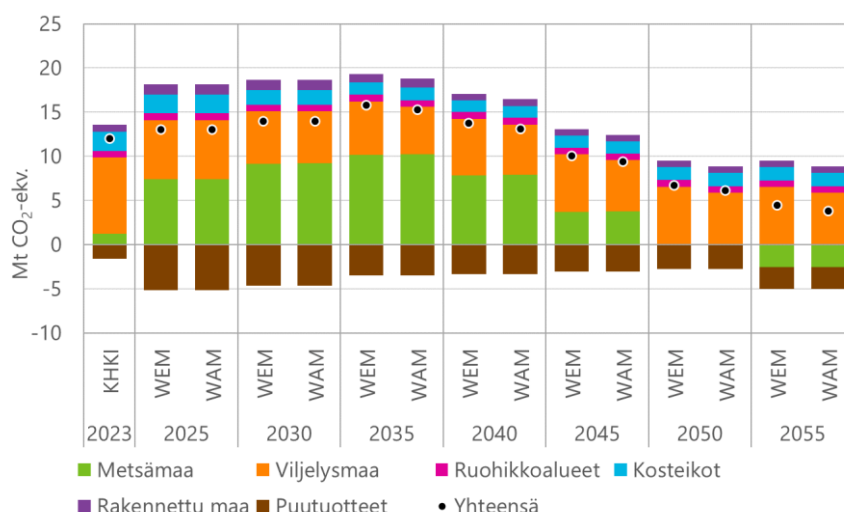
Metsämaan hiilitaseella on suurin vaikutus maankäyttösektorin kokoon ja kehitykseen, ja se vaihtelee vuodesta toiseen lähinnä hakkuutasojen vaihtelun takia. Metsämaa on päästölähde vuodesta 2025 vuoteen 2050 molemmissa skenaariossa ja kääntyy pieneksi nieluksi vasta vuonna 2055. Muiden maankäyttöluokkien (viljelysmaiden, ruohikkoalueiden, kosteikoiden ja rakennettujen alueiden) päästöt ovat vakaampia, vaikka niiden päästöt pienenevät yhteensä 2,9 Mt CO₂-ekv. WEM-skenaariossa ja 3,5 Mt CO₂-ekv. WAM-skenaariossa vuoteen 2055 mennessä nykytasoon verrattuna. Päästövähennys on suurempi WAM-skenaariossa, mikä johtuu muun muassa turvepeltojen laajemmista vettämis- ja kosteikkoviljelyalueista verrattuna WEM-skenaarioon.

Puutuotteet ovat netto-nielu tarkastelujaksolla molemmissa skenaariossa. Nielu pienenee -5,2 miljoonasta hiilidioksidiekvivalenttitonnista vuonna 2025 -2,5 miljoonaan hiilidioksidiekvivalenttitonniin vuonna 2055. Metsäteollisuudessa käytetyn kotimaisen ja tuontipuun määrä sekä eri tuoteryhmien tuotantomäärät

ovat samat WEM- ja WAM-skenaariossa (luku 2.5.2), ja siten myös puutuotteiden nettonielun kehitys on sama. Tuotannon kasvaessa tarkastelujakson alussa myös nielu kasvaa, mutta tuotannon pysyessä samalla tasolla vanhan hiilivaraston poistuma alkaa pienentää nielua. Puutuotelaskennan lähtöaineisto on muuten sama kuin PEIKKO-hankkeen WEM-P-skenaariossa (Koljonen ym. 2024), mutta vuoden 2023 tuotanto- ja puunkäyttömäärät on päivitetty vastaamaan viimeisimmässä kasvihuonekaasuinventaariossa käytettyjä lukuja (Tilastokeskus 2025a), mikä vaikuttaa myös tulevaisuuden puutuotevarastoon.

Taulukko 14. Maankäyttösektorin tulokset WEM- ja WAM-skenaarioissa maankäyttöluokittain. Positiivinen luku on päästö ja negatiivinen poistuma (nielu). Vuosi 2023 vastaa KHK-inventaarion arvoja (Tilastokeskus 2025a).

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
WEM								
Yhteensä	12,00	13,00	14,00	15,80	13,74	10,02	6,74	4,46
Metsämaa	1,22	7,40	9,16	10,18	7,85	3,71	0,07	-2,55
Viljelysmaa	8,65	6,69	5,91	6,03	6,39	6,51	6,48	6,50
Ruohikkoalueet	0,70	0,77	0,77	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73
Kosteikot	2,20	2,08	1,65	1,37	1,30	1,33	1,49	1,54
Rakennetut alueet	0,82	1,22	1,20	0,97	0,78	0,76	0,72	0,73
Puutuotteet	-1,60	-5,17	-4,68	-3,52	-3,34	-3,04	-2,76	-2,49
WAM								
Yhteensä	12,00	13,00	13,99	15,25	13,12	9,39	6,11	3,83
Metsämaa	1,22	7,42	9,22	10,23	7,88	3,73	0,07	-2,55
Viljelysmaa	8,65	6,68	5,85	5,35	5,71	5,84	5,81	5,84
Ruohikkoalueet	0,70	0,77	0,77	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73
Kosteikot	2,20	2,08	1,65	1,46	1,33	1,36	1,52	1,58
Rakennetut alueet	0,82	1,22	1,19	0,96	0,78	0,75	0,73	0,72
Puutuotteet	-1,60	-5,17	-4,68	-3,52	-3,34	-3,04	-2,76	-2,49

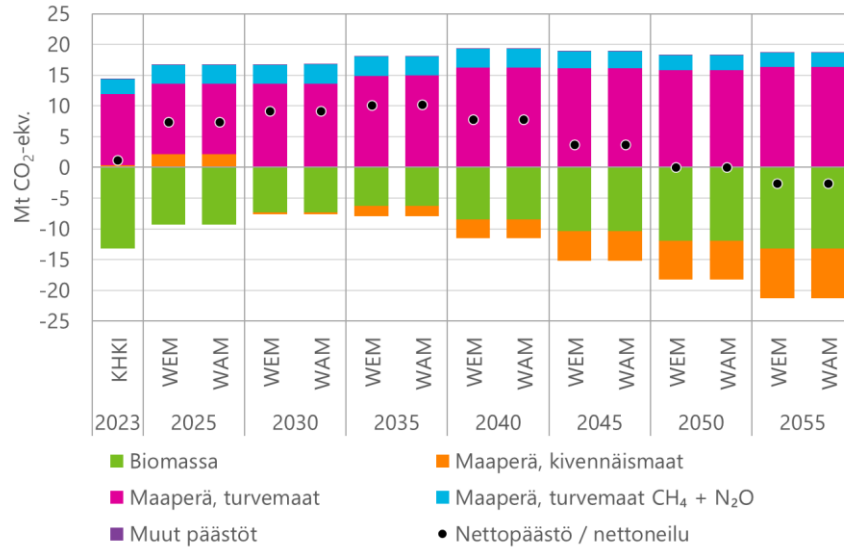


Kuva 29. Maankäyttösektorin päästö- ja poistumakehitys maankäyttöluokittain WEM- ja WAM-skenaariossa. Positiivinen luku on päästö ja negatiivinen poistuma (nielu). Vuosi 2023 vastaa KHK-inventaarion arvoja (Tilastokeskus 2025a).

Koska metsien käyttöön ja hoitoon kohdistuvat WAM-skenaarion politiikkatoimet jätettiin laskennan ulkopuolella, metsämaan päästöjen ja nielujen kehitykset ovat molemmissa skenaarioissa lähes samat (Kuva 30). Marginaaliset erot johtuvat skenaarioiden vähäisistä energiapuun korjuumäärien ja pinta-alojen eroista. WAM-skenaariossa lisääntynyt heikkotuottoisten peltujen metsitys WEM-skenaarioon verrattuna kasvattaa hieman sekä puuston nielua että metsämaan maaperän päästöjä, mutta muutokset ovat hyvin pieniä verrattuna metsämaan kokonaishiilitaseeseen.

Puusto pysyy nettoinieluna koko tarkastelujakson ajan ja on noin -10 Mt CO₂-ekv. vuosina 2025–2030, -6 Mt CO₂-ekv. 2035–2040, -10 Mt CO₂-ekv. 2045–2050 ja -13 Mt CO₂-ekv. vuonna 2055. Kivennäismaametsien maaperä on pieni päästölähde vuonna 2025 ja nielu vuodesta 2030 lähtien. Kivennäismaiden nielu kasvaa vuoden 2030 noin nolasta -8 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonniin vuonna 2055. Puuston ja kivennäismaiden nielut eivät kuitenkaan riitä kompensoimaan turvemaametsien suuria maaperäpäästöjä ennen vuotta 2055. Turvemaametsien CO₂-päästöt ovat 11–15 Mt CO₂-ekv. kaudella 2025–2035 ja 16 Mt CO₂-ekv. 2040–2055. Niiden metaani- ja dityppioksidipäästöt ovat 3 Mt CO₂-ekv. 2025–2045 ja 2 Mt CO₂-ekv. 2050–2055. Muut päästöt (typpilannoituksen, typen mineralisaation sekä maastopalojen, kulituksen ja ennallistamispolttojen päästöt) jäävät alle 0,1 Mt CO₂-ekv. tarkastelujaksolla.

Puuston nettoinielun kehitys seuraa hakkuukertymän kehitystä (luku 2.5.2), vaikkakin pienellä viiveellä. MELA-tulosten perusteella laskettu puuston biomassan kasvu ja poistuma kymmenen vuoden jaksoille kohdennetaan jakson keskivuodelle siten, että esimerkiksi MELA-kauden 2029–2038 hakkuukertymän ja metsänhoidon mukainen kasvu ja poistuma kohdennetaan metsämaaluokassa vuodelle 2034.



Kuva 30. Metsämaan kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien kehitys WEM- ja WAM-skenaariossa eriteltynä hiilivarastoihin ja päästölähteisiin. Positiivinen luku on päästö ja negatiivinen poistuma (nielu). Muut päästöt sisältävät typpilannoituksen, typen mineralisaation sekä maastopalojen, kulotuksen ja ennallistamispolttojen päästöt. Vuosi 2023 vastaa KHK-inventaarion arvoja (Tilastokeskus 2025a).

5 Kokonaisarvio keskipitkän aikavälin energia- ja ilmastotavoitteiden toteutumisesta nykyisin ja lisäksi toimin

Tiina Koljonen, VTT

EU:n energiatehokkuusdirektiivi (EU 2023/1791) ja uusiutuvan energian direktiivi (EU 2023/2412) ja määrittävät Suomelle uudet vuodelle 2030 asetetut sitovat tavoitteet energian loppukulutukselle ja uusiutuvan energian osuuteen loppuenergiankulutuksesta. EU:n asettama uusiutuvan energian tavoite vuodelle 2020 oli 38 % energian loppukulutuksesta ja se ylitettiin prosenttiyksiköllä. Komissio asetti vuodelle 2030 alun perin uusiutuvan tavoitteeksi 55 % energian loppukulutuksesta ja PM Sanna Marinin hallituksen aikana laaditun skenaariotarkastelun mukaan (Koljonen ym. 2021) uusiutuvan energian tavoite olisi ylitetty reilusti. PEIKKO-hankkeen raportissa (Koljonen ym. 2024) todettiin, että Suomelle arvioitu uusi, FitFor55-lainsäädäntöpakettin myötä tuleva uusiutuvien tavoite olisi 60 % energian loppukulutuksesta ja että se saavutettaisiin PEIKKO-WEM-skenaariossa. Kansallisen integroidun energia- ja ilmastosuunnitelman mukaan uusiutuvien tavoite vuodelle 2030 olisi 62 % energian loppukulutuksesta (MEA 2024). KEITO-hankkeen WEM- ja WAM-skenaariolaskelmien mukaan tämä ylitettäisiin niukasti molemmissa skenaarioissa. Uusiutuvan energian osuuden oletettu kasvu on siten hyvin nopeaa, kun verrataan vuoden 2020 tasoon. WAM-skenaariossa uusiutuvien osuuskasvua vuoteen 2030 mennessä edistävät EU:n politiikat ja direktiivit, mutta samalla kansalliset WAM-skenaarioon sisällytetyt muutokset valmisteveroihin ja jakeluvelvoitteeseen vähentävät uusiutuvien osuutta energian loppukulutuksesta, jonka vuoksi WAM-skenaariossa uusiutuvien osuus päättyy lähes samaan osuuteen kuin WEM:ssä (ks. liite B). Pitkällä aikavälillä oletetut investoinnit ydinvoimaan vähentävät myös investointivauhtia uusiutuviin.

EU:n energiatehokkuusdirektiivin mukaisten laskentasäännöin arvioitu energian loppukulutus olisi sekä WEM- että WAM-skenaariossa arviolta noin 270 TWh vuonna 2030. Tämä on noin 30 TWh yli EU:n asettaman sitovan tavoitteen Suomelle, joka vastaa myös PEIKKO-hankkeen WEM-P-skenaariota (Koljonen ym. 2024). EU:n energian loppukulutustavoite näyttää siten Suomelle hyvin haasteelliselta saavuttaa huolimatta voimakkaasta energian käytön tehostumisesta energijärjestelmän sähköistymisen ja infrastruktuuriin

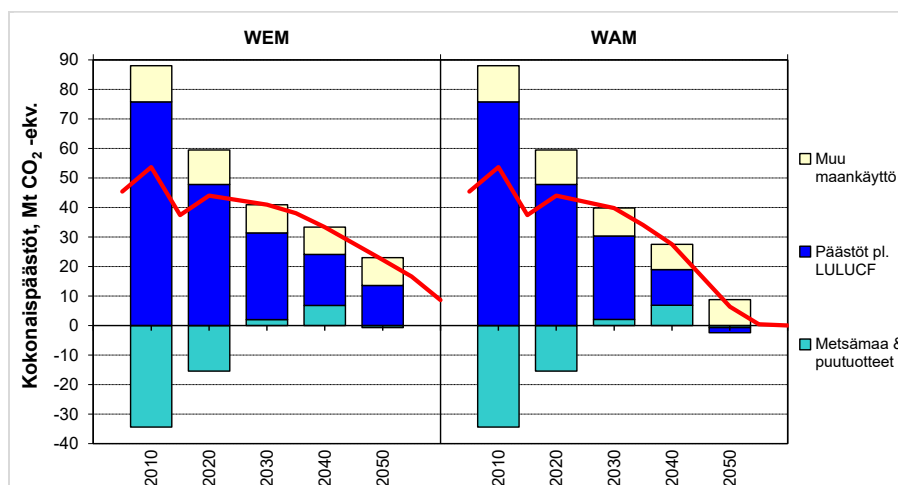
uusiutumisen myötä. Energian käytön tehostuminen näkyy erityisesti rakennus- ja liikennesektoreilla. Teollisuuden osalta kehitystä on vaikeampi arvioida, koska teollisuuden irtautuminen fossiilisten polttoaineiden käytöstä yleisesti tehostaa energiankäyttöä, mutta investoinnit hiilidioksidin talteenottoon puolestaan lisäävät energiankulutusta. Teollisuuden energian loppukulutus on kuitenkin suuressa määrin riippuvainen teollisuuden tuotannon tuotteista ja tuotannon volyymistä. Esimerkiksi jalostus- ja kierrätysasteen nosto voi kasvattaa energiankulutusta, jota ei ollut mahdollista tarkastella tässä hankkeessa. Merkittävää epävarmuutta energian loppukulutuksen kehityksen osalta tuo lisäksi palvelusektorin kehitys, johon sisältyy myös datakeskukset. Mikäli Suomeen investoidaan merkittävässä määrin uusia konesaleja, energian loppukulutus kasvaa huolimatta hukkalämmön hyödyntämisestä. Energian loppukulutustavoitteen saavuttamiseen vuoteen 2030 mennessä liittyy siten hyvin merkittävää epävarmuutta.

WEM- ja WAM-skenaariomallinnusten perusteella kansalliseen ilmastolakiin kirjattu 60 % päästövähennys vuonna 2030 vuoden 1990 päästötasoon verrattuna voitaisiin saavuttaa verrattain vähäisin lisätoimin (Kuva 31). WEM-skenaariossa ero vuoden 2030 päästötavoitteeseen nähden, eli päästökuilu, on noin 0,7 Mt CO₂-ekv. WAM-skenaarion oletetuilla lisätoimilla (vrt. liite B) vuoden 2030 päästötavoitteen alitus on noin 0,4 Mt CO₂-ekv. Mallinuksissa kuitenkin on oletettu, että mittavat investoinnit uusiutuvan energiaan ja muuhun infrastruktuuriin toteutuvat myös jatkossa pääosin markkinaehtoisesti. Sen sijaan vuosien 2040 ja 2050 kasvihuonekaasupäästötavoitteita ei tulosten mukaan saavuteta nykyisin politiikkatoimin, vaan tarvitaan lisätoimia. WEM-skenaariossa päästökuilu on vuonna 2040 noin 3,0 Mt CO₂-ekv. ja vuonna 2050 noin 6,4 Mt CO₂-ekv. WAM-skenaariossa päästöjen lisävähennykset painottuvat vuoden 2030 jälkeen vahvasti hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin energiasektorilla ja metsäteollisuudessa. WAM-skenaarioiden mukaan vuoden 2040 päästötavoitteen alitus olisi noin 2,3 Mt CO₂-ekv. ja vuodelle 2050 jopa 8,9 Mt CO₂-ekv. Toisaalta mittavatkaan investoinnit teknisiin hiilinieluihin eivät riitä kompensoimaan maankäyttösektorin nettopäästöjä siten, että Suomi saavuttaisi vuoteen 2035 mennessä hiili-neutraaliuden ja hiilinegatiivisuuden sen jälkeen. WEM-skenaariossa yhteen-lasketut KHK-päästöt maankäyttösektorin kanssa johtavat nykytoimin vajaaseen 38 Mt CO₂-ekv. kokonaispäästöön vuonna 2035 ja vastaavasti WAM-skenaariossa vajaaseen 34 Mt CO₂-ekv. kokonaispäästöön. WEM-skenaarion lähtöoletuksilla ja nykyisillä ohjaustoimilla Suomi ei saavuttaisi hiilineutraalisuutta koko skenaariolaskelmien tarkastelujaksolla vuoteen 2055 mennessä. WAM-skenaariossa mittavat investoinnit KHK-päästöjen vähentämiseen, mukaan lukien tekniset hiilinielut, johtaisivat hiilineutraalisuuteen vuoden 2050 jälkeen, kun samalla maankäyttösektorin nettopäästöt ovat alentuneet vajaaseen 4 Mt CO₂-ekv.-tasolle. Mikäli Suomi aikoo pitää kiinni hiilineutraalisuustavoitteestaan vuonna 2035 ja pyrkii edelleen hiilinegatiiviseksi sen jälkeen, tarvitaan paitsi investointeja KHK-päästöjen vähentämiseen kaikilla päästösektoreilla myös hyvin merkittäviä toimia maankäyttösektorilla. Luke laati myös herkkyyštarkastelun, jossa metsäteollisuuden puun kysyntä laskettiin PEIKKO WEM-Low-variantin tasolle, jolloin hakkuukertymä vuonna 2035 oli noin 10 Mm³ alhaisempi kuin KEITO:n

WEM- ja WAM skenaarioissa (MMM 2025a). Tällöin LULUCF-sektori oli nettonielu päätyen noin -7,9 Mt CO₂-ekv. päästöjen poistumaan, jolloin päästökaulu olisi ollut pienempi. Tässä tulee kuitenkin huomata, että oletukset alhaisemmasta metsäteollisuuden tuotannosta muuttavat koko energia- ja päästötasetta, joten vaikutuksia päästöjen kokonaistaseeseen ei pysty suoraan arvioimaan.

Tuoreessa Ilmastovuosikertomuksessa (Ympäristöministeriö 2025e) tuodaan esille, että kansallisen ilmastolain mukaan nielen määrätelmä kattaa myös teknologiset hiilinielut ja että ne voitaisiin huomioida nettonielsen laskennassa luonnollisten hiilinielujen ohessa. Samalla kuitenkin raportissa todetaan, että ilmastolaki ei aseta tavoitteita negatiivisille päästöille (eli poistumille) eikä säädä teknisten hiilinielujen käyttömahdollisuuksista osana ilmastopolitiikkaa. Mikäli WAM-skenaarion teknisiä hiilinieluja ei huomioitaisi, saavutettaisiin WAM-skenaarion mukaan edelleen vuoden 2030 päästötavoite, mutta vuonna 2040 päästökaulu olisi jo yli 1,4-CO₂-ekv. ja vastaavasti vuonna 2040 lähes 4 Mt CO₂-ekv.

EU:n Suomelle asettama taakanjakosektorin tavoite edellyttää, että taakanjakosektorin KHK-päästöt tulisi laskea tasolle 17,1 Mt CO₂-ekv. vuonna 2030. Muille vuosille vastaavaa veloitetta ei ole toistaiseksi määritetty, joten tässä tarkastellaan ainoastaan vuotta 2030. WEM-skenaariolaskelmien mukaan taakanjakosektorin KHK-päästöt ovat 1,8 Mt CO₂-ekv. yli tavoitetasen ja vastaavasti WAM-skenaariossa päästökaulu oli 1,0 Mt CO₂-ekv. EU:n taakanjakoasetuksen mukaan tavoite on kumulatiivinen, jolloin aiempien vuosien päästökauluun alitus (tai vastaavasti ylitys) voidaan huomioida seuraavien vuosien päästökauluissa. WAM-skenaariossa taakanjakosektorin päästötavoite näyttäisi toteutuvan edellyttäen, että vuosina 2025-2030 päästökaulu ei ylitetä (ks. Kuva 28).



Kuva 31. Kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien kokonaistase WEM- ja WAM-skenaariossa 2010–2050.

6 Kansantalouden kehitys

Juha Honkatukia, Merit Economics & Santtu Karhinen, Syke

Tässä luvussa raportoidaan KEITO-hankkeen kansantaloutta koskevat vaikutusarviot. WAM-skenaarion toimien vaikutusta tarkastellaan suhteessa kansantalouden WEM-skenaarioon. Perusskenaariossa oletetaan, ettei sen paremmin tuottavuuden kuin työvoiman saatavuudenkaan suhteen tapahdu suuria muutoksia. Väestökehitys noudattaa Tilastokeskuksen väestöennustetta (Tilastokeskus 2021) ja hallituksen politiikkatoimia on huomioitu siltä osin kuin niistä on ollut konkreettisia linjauksia. Arviot on laskettu kansantalouden tasapainomallilla (Honkatukia 2009, 2019).

Kuvassa 32 on kuvattu perusskenaarion laadintaa kansantalouden tasapainomallin avulla. Punaiset elementit kuvaavat toimintaympäristöä, jonka muutokset otetaan annettuna. Vihreällä kuvatut talouden toimijat ratkaisevat optimointiongelman, joka kuluttajien osalta on mahdollisimman korkean hyvinvoinnin saavuttaminen toimintaympäristön mahdollistamilla tuloilla ja yritysten osalta taas puhdas voitonmaksimointi. Näiden kohdatessa ratkeavat markkinoilla tavaroiden ja palvelujen kulutus, tuotannon määrä, tuotannontekijäkorvaukset ja esimerkiksi julkisen sektorin tulot. Perusskenaario rakentuu arviolle siitä, millaisiksi toimialojen ja talouden kehitys muotoutuu, jos toimintaympäristöön historialliset trendit jatkuvat. Keskeisimpiä näistä trendeistä ovat väestönkasvu, joka määrittää varsin pitkälle kansantalouden kasvukykyä; tuottavuuskasvu, joka koostuu eri toimialojen hyvinkin erilaisista kasvuvauhdeista; pääoman tuotto-odotuksista, jotka nekin historian valossa poikkeavat toimialojen välillä huomattavasti; ja tietenkin ulkomaankaupan ja maailmanmarkkinoiden kehityksestä, jonka pienen avotalouden toimijat joutuvat ottamaan enemmän tai vähemmän annettuna. Nämä trendit määrittelevät kuitenkin lähinnä toimialojen kasvuedellytyksiä ja kasvuennuste riippuu siksi ennen kaikkea toimialojen kytköksistä ja tuotannontekijöiden saatavuudesta sekä myös talouspolitiikasta.

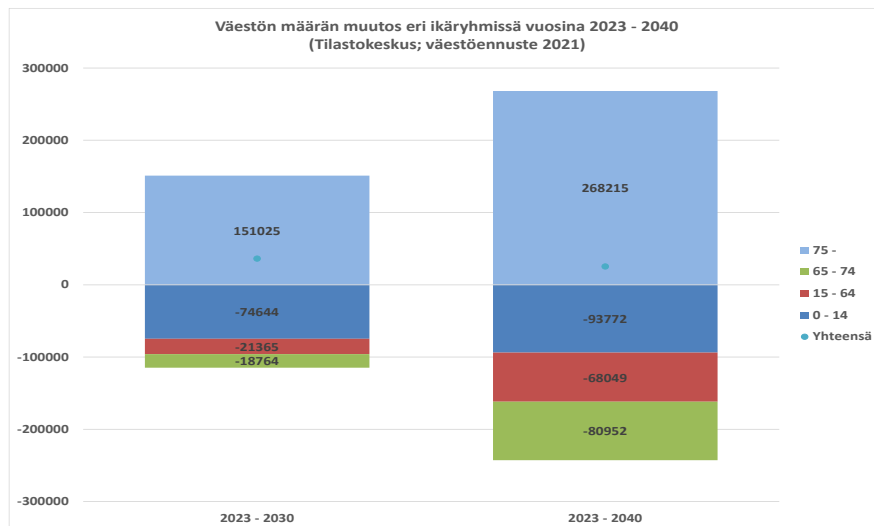
aikasarjoihin. Väestöennusteena on käytetty Tilastokeskuksen vuoden 2021 väestöennustetta, kuten muissakin KEITO-mallinnuksissa.

Ulkomaankaupan trendejä on arvioitu ennen kaikkea tullin ulkomaankauppatilastojen perusteella. Ne kattavat sekä viennin että tuonnin SITC¹⁵-tuoteryhmittäin. Lisäksi tilastoissa raportoidaan viennin ja tuonnin yksikköarvoindeksit. Ennakoinnissa oletetaan, että vienti on riippuvainen maailmanmarkkinoiden kehitystrendeistä sekä suomalaisten tuotteiden hintakilpailukyvyistä.

Eräiden toimialojen osalta kasvuennuste perustuu ulkoisiin arvioihin. Energiantuotannon, metsäteollisuuden, metalliteollisuuden ja öljynjalostuksen kasvuarvot noudattavat lähtökohtaisesti luvuissa 2.3 ja 2.5.2 esitettyjä arvioitakun taas koulutus- ja sotealojen kasvu noudattaa THL:n arviota palvelutarpeen kasvusta.

Ennakoinnin perusskenaariossa on otettu huomioon myös hallitusohjelman tavoitteita siltä osin kuin ne ovat kvantifioitavissa. Suurimmat rahamääräiset tavoitteet hallitusohjelmassa koskevat sotepalveluja, josta pitäisi tuottavuuden paranemisen kautta säästöä syntyä hieman yli 2 miljardia euroa. Sosiaaliturvan kaavailtu 1,2 miljardin euron säästö on kohdennettu tulonsiirtoihin. Seuraavaksi suurin erä koskee infra- ja väylähankkeita, jotka kohdentuvat väylänpidon toimialoille. Myös valmisteverotusta muutetaan. Väestönkasvu määrittää skenaarioissa työvoiman saatavuuden ja vaikuttaa keskeisesti julkisten menojen kehitykseen. Kuvassa 33 on esitetty väestön määrän muutos eri ikäryhmissä. Ennusteen mukaan väestörakenne on nopeasti muuttumassa. Kun väestö kasvaa vuoteen 2040 mennessä noin 25 000:llä hengellä, pienenee työikäinen väestö vuoden 2023 reilusta 3,4 miljoonasta 68 000:lla vuoteen 2040 mennessä. Samaan aikaan yli 75-vuotiaiden määrä kasvaa lähes 270 000:llä.

¹⁵ SITC (Standard International Trade Classification) on Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) julkaisema kansainvälisen kaupan luokittelu.



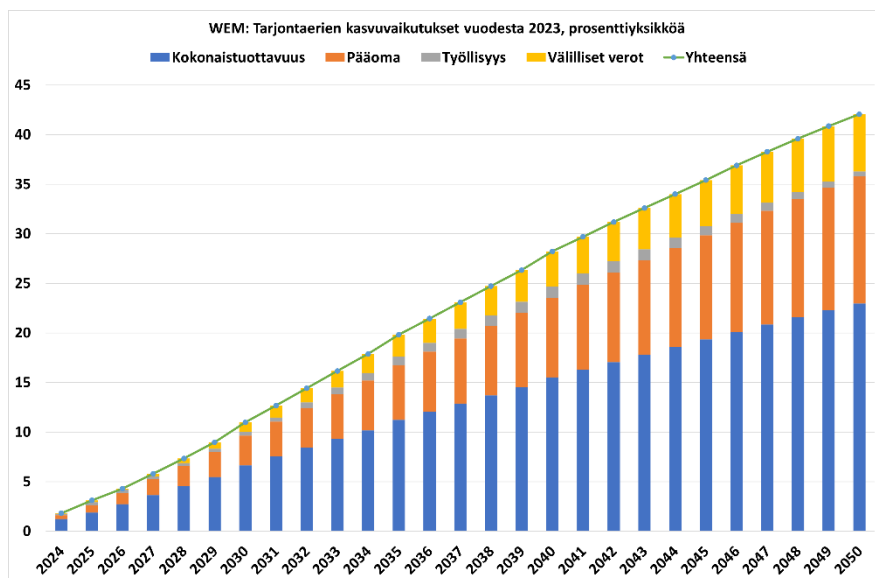
Kuva 33. Väestön määrän muutos ikäryhmittäin vuosina 2023–2040.

Makrotalouden tasolla ennakkoinnin tuloksia voidaan kuvata tarjontaerien ja kysyntäerien kasvuvaikutuksien avulla. Nämä kasvuhajotelmat esittävät kansantuotteen kasvun osatekijöidensä summana. Kasvuhajotelmat kuvaavat kansantuotteen erien vaikutusta kokonaismuutokseen. Kansantuotehan voi kasvaa, jos pääoma- ja työpanosten käyttö ja kokonaistuottavuus kasvavat. Kasvuhajotelmassa niiden kasvu painotetaan kansantuoteosuuksilla, jolloin saadaan tekijöiden kasvuvaikutus kokonaisuuden kasvuun - ne ovat siis kansantuote-erien osuuksilla painotettuja muutoksia, jotka kertovat siitä, millä kansantalouden sektoreilta arvioidut muutokset ovat peräisin.

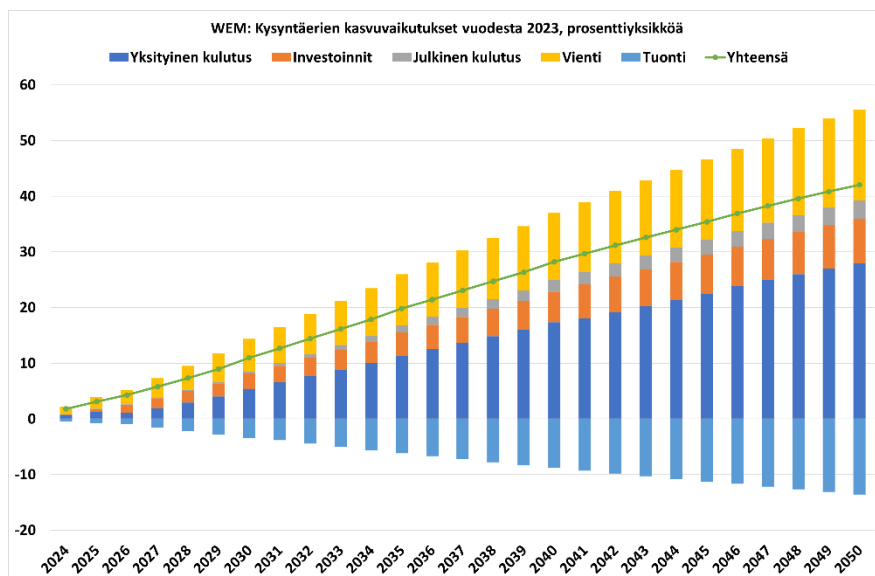
Kansantuotetta voidaan tarkastella sekä tarjontatekijöiden että kysyntätekijöiden kautta. Kuvassa 34 on kuvattu kansantuotteen kasvu tarjontatekijöiden kasvuvaikutusten avulla. Lisäksi tarjontapuolen kansantuotteeseen luetaan välillisten verojen vaikutus, joka Suomessa on noin kymmenesosa kansantuotteesta. Yhteensä kansantuote kasvaa noin neljäkymmentäkaksi prosenttia vuodesta 2023. Kasvusta noin kaksikymmentäkolme prosenttiyksikköä syntyy tuottavuuden kasvusta. Noin kolmetoista prosenttiyksikköä syntyy pääoman kasvusta ja kuutisen prosenttiyksikköä välillisten verojen kautta. Työpanoksen kautta kasvua syntyy 2030 luvun aikana lähes prosenttiyksikön verran, mutta vuoteen 2050 mennessä tämä vaikutus on enää 0,5 prosenttiyksikköä. Keskeinen syy tähän on demografiassa: kun työikäinen väestö ei enää kasva, työllisyyden kasvu nojaa työllisyysasteen nousuun, jonka oletetaan nousevan hallitusohjelmassa tavoiteltuun 80 prosenttiin. Jos hallituksen työllisyystavoite toteutuu, se lisää työllisten kokonaismäärää keskipitkällä aikavälillä, mutta pitkällä aikavälillä

työllisten kokonaismäärä ei siitä enää juuri kasva, koska työikäisen väestön määräkään ei kasva.

Kuvassa 35 tarkastellaan kasvua kysyntätekijöiden kasvuvaikutuksien kautta. Noin 28 prosenttiyksikköä kasvusta syntyy yksityisen kulutuksen kasvusta, kahdeksan prosenttiyksikköä investointikysynnän kautta ja reilu kolme prosenttiyksikköä julkisen kulutuksen kautta. Julkisen sektorin rooli ei siis ole ratkaiseva, kun tarkastellaan kulutusta, vaan se on pikemminkin tulonsiirtojen puolella. Viennin kasvuvaikutus on vuoteen 2050 mennessä yli 16 prosenttiyksikköä, kun taas tuonnin vaikutus – joka pienentää kansantuotetta – on noin -13,5 prosenttia.

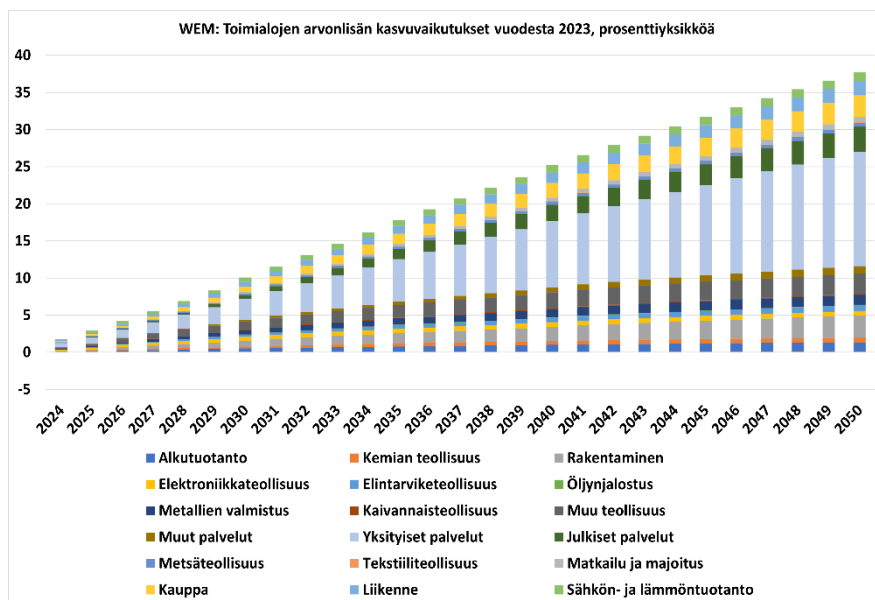


Kuva 34. WEM: tarjontaerien kasvuvaikutukset vuodesta 2023, prosenttiyksikköä.



Kuva 35. WEM: kysyntäerien kasvuvaikutukset vuodesta 2023, prosenttiyksikköä.

Kuvaan 36 on kuvattu toimialojen arvonlisän kautta syntyvä kasvuvaikutus. Arvonlisien kasvuvaikutusten summa on pienempi kuin kansantuotteen kasvu, koska siitä puuttuu välillisten verojen vaikutus. Arvonlisän kautta suurin vaikutus syntyy yksityisten palvelujen kautta. Tässä niihin luetaan muun muassa liike-elämän palvelut, rahoitus ja tietoliikenne, mutta myös kiinteistöjen hallinnan ja vuokrauksen toimialat, joille sijoittuu suuri osa kansantalouden pääomakannasta. Teollisuuden osuus arvonlisästä on alle viidenneksen, ja niin on sen kasvuvaikutuskin, joka on noin 18 prosenttiyksikköä. Rakentamisen kasvuvaikutus on hieman yli kolme prosenttiyksikköä ja kaupan hieman vajaa kolme prosenttiyksikköä. Julkisten palvelujen kautta syntyy noin 3,4 prosenttiyksikön kasvuvaikutus.



Kuva 36. WEM: toimialojen arvonlisän kasvuvaikutus vuodesta 2023, prosenttiyksikköä.

Työllisyyden ennakoitu kehitys eri toimialoilla on ennen kaikkea vientikysynnän, ja kotimaisen julkisen sektorin kysynnän ja osin kotitalouksien kulutuksen kautta johdettua kysyntää, johon vaikuttaa ennen kaikkea reaaliansoioiden kehitys. Kokonaistyöllisyys määräytyy kuitenkin työn tarjonnan kautta - viime kädessä siis työikäisen väestön määrän kehityksestä sekä työllisyysasteesta. Työllisyysasteen kehitys oletetaan hallitusohjelman tavoitteiden mukaisesti nousevan 80 prosenttiin.

Työllisten määrä kasvaa perusskenaariossa eniten julkisten palvelujen ja julkisen hallinnon toimialoilla. Valtaosa tästä kasvusta johtuu sote-alojen henkilöstötarpeen kasvusta. Toimialarakenne muuttuu palveluvaltaisemmaksi mutta samaan aikaan myös rakentamisen toimialan osuus kasvaa. Muilla aloilla työllisyys voi kasvaa vain vähän ja useilla aloilla työllisyys pikemminkin laskee. Samaan aikaan palveluistuminen lisää kysyntää palveluille, kun taas rakentamisen osuutta kasvattavat jatkuva kaupungistuminen ja myös vihreä siirtymä.

6.2 WAM-skenaario

WAM-skenaariota kuvataan tässä muutoksena suhteessa WEM-skenaarioon. WAM-skenaariossa vaikutukset kansantalouteen syntyvät ennen kaikkea lisäinvestoinneista energiantuotannossa mutta myös energiatehokkuuden lisäämiseen rakennusten lämmityksessä ja tuotantoprosesseihin sekä muun muassa liikenteen sähköistymiseen. WAM-skenaariossa otetaan myös huomioon oletukset uusista ohjaustoimista.

Kansantaloudellisessa arvioinnissa otetaan lähtökohdaksi TIMES-VTT-mallilla tehtyjen laskelmien tulokset polttoaineiden ja energiantuotannon ja -kulutuksen muutoksista eri sektoreilla sekä ne investoinnit, joita muutoksen toteuttaminen vaatii. Keskeiset lähtökohta-oletukset ovat siten:

- TIMES-VTT-mallin arviot energiantuotannon uusiutumisesta (polttoaineiden käyttö, investoinnit uusiutuvaan energiaan ja ydinvoimaan)
- TIMES-VTT-mallin arviot rakennussektorin ja keskeisten teollisuudenalojen energiankäytön uusiutumisesta (polttoaineet, investoinnit)
- Liikenteen osalta arvio käyttää VTT:n ELIISA-mallin tuloksia WEM- ja WAM-skenaarioiden muodostamiseen, jossa keskeinen muutos on ajoneuvokannan sähköistyminen 2020-luvun kuluessa. Siten, että WEM-skenaariossa sähköautojen – ladattavien ja täyssähköautojen - lukumäärä saavuttaa 984 000 vuoteen 2030 mennessä ja vastaavasti 998 000 lukumäärän WAM:ssa

Kansantaloudelliset kustannukset syntyvät tarvittavien toimien aiheuttamista lisäinvestoinneista, jotka kasvavat päästöjen vähennystavoitteen myötä. Investoinnit uudistavat kuitenkin talouden kulutus- ja tuotantorakenteita, mistä syntyy merkittävää tehostumista ja myös uusia mahdollisuuksia, kun talous sähköistyy, ja sähköön tuotanto muuttuu päästöttömäksi. Uudet teknologiat korvaavat fossiilisia myös tuotannossa, jolloin tuotannon energia- ja materiaalihyöty kasvaa.

WAM-skenaariossa oletetaan, että suuren kokoluokan teollisuus- ja infrastruktuuri-investoinnit toteutuisivat, vaikka ne eivät olisikaan taloudellisesti kannattavia nykypolitiikoilla. Taustalla on oletus toimintaympäristön muutoksesta esimerkiksi EU:n ja/tai kotimaan politiikan myötä. Arvio kohdentaa investoinneille kuitenkin sellaiset tuet, joista on tehty päätös. Skenaariossa otetaan huomioon muutkin ohjauskeinot, joista keskeiset koskevat polttoaineverotusta, ajoneuvojen hankinnan ja käytön verotusta sekä päästökauppaa (ETS1 ja ETS2). Keskeisiä WAM-skenaariota koskevia oletuksia näistä ovat:

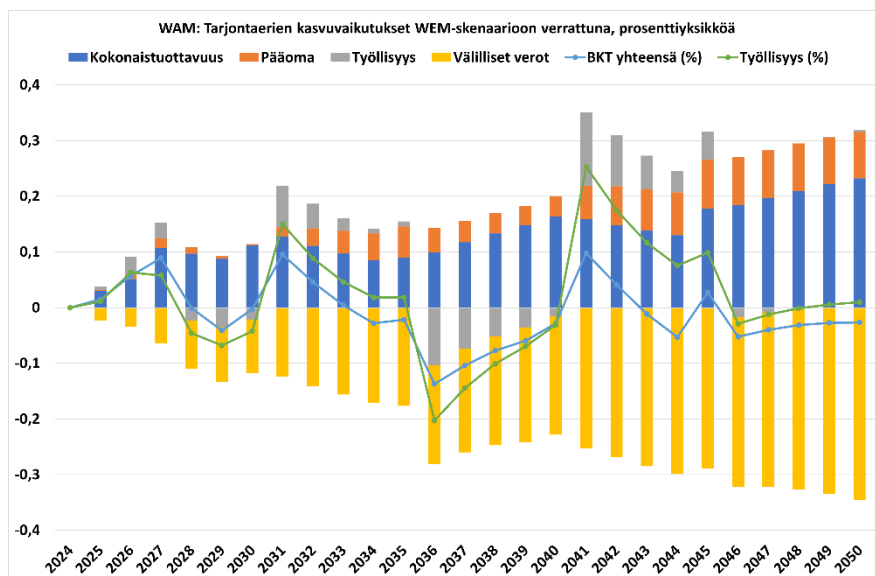
- energiaverojen päätetyt muutokset PM Orpon hallituskaudella (ks. liite B)
- Euroopan laajuisen päästökaupan laajeneminen vuonna 2027 (ETS2)
- 2027 jälkeen polttoaineverojen inflaatiotarkistus (WEM:ssa oletettiin reaalihinnan koko laskentajakson ajalle).
- ammattidieselin käyttöönotto
- sähköautojen ja matkailuautojen ajoneuvoverojen korotukset hallituskaudella
- kevyen liikenteen ja joukkoliikenteen tuet.

Kaikkiaan valtion menot kasvavat edellä esitettyjen tukien myötä yli 400 miljoonalla mutta verotulot kasvavat lähemmäs 500 miljoonalla, kun ETS2 käynnistyy vuonna 2027.

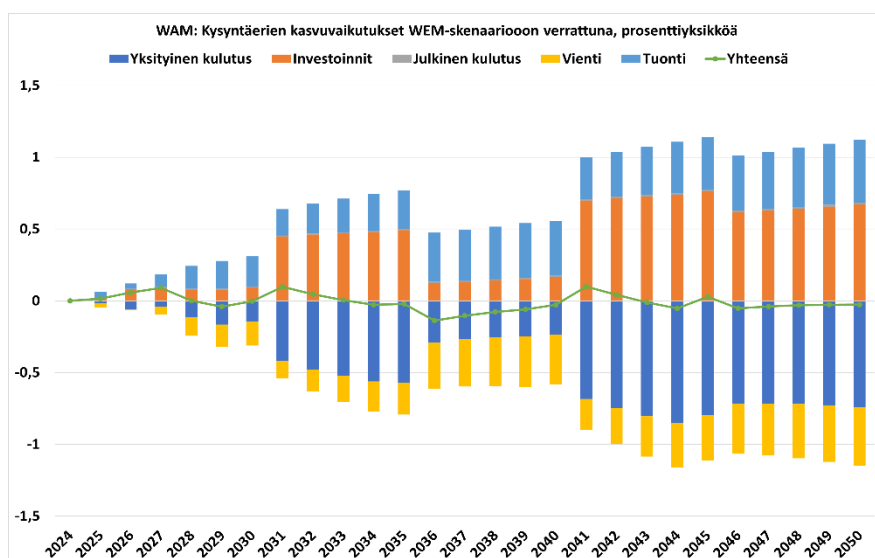
Politiikan vaikutuksia kuvataan samaan tapaan kuin WEM-skenaariotakin kansantuotteen kasvuhajotelmien avulla, mutta nyt verrattuna WEM-skenaarioon. Kuvassa 37 on esitetty WAM-skenaariota koskevat tulokset kansantuotteen tarjontaerien kasvuhajotelmien avulla. Kuvasta näkyy, kuinka talouden eri sektoreilla tehtävät investoinnit näkyvät kahtaalla: ne lisäävät käytössä olevaa pääomakantaa, mikä

näkyä pääoman positiivisena kasvuvaikutuksena, ja niiden myötä myös kokonaistuottavuus kasvaa, kun talouden energia- ja materiaalitehokkuus paranevat, ja tämä näkyä kokonaistuottavuuden positiivisena kasvuvaikutuksena. Osa kokonaistuottavuuden kasvusta liittyy toki myös työn tuottavuuden paranemiseen pääomakannan kasvaessa työpanokseen nähden. Kuvassa **Kuva 37** on esitetty myös työllisyyden muutos WEM-skenaarioon nähden. WAM-skenaarioiden politiikkatoimissa ei kuulu työn tarjontaan vaikuttavia toimia, eikä työllisyys pidemmällä aikavälillä siksi juuri muutu WEM-skenaarioon verrattuna. Aika ajoin, etenkin 2020-luvun lopulla ja 2030- ja 2040-lukujen alussa tehtävät suuret investoinnit kuitenkin lisäävät työvoiman kysyntää ja tällöin työllisyyskin kasvaa. Työmarkkinoiden ylikuumenemisen myötä reaali-palkat pyrkivät kuitenkin nousemaan, ja investointivauhdin hiipuessä työllisyys heikkenee joksikin aikaa 2030- ja 2040-lukujen jälkipuoliskoilla. Kuvasta näkyä myös, että välillisten verojen vaikutus kansantuotteen kasvuun on negatiivinen. Tämä johtuu siitä, että päästöjen vähenemisen ja sähköistymisen myötä energiaverotuksen veropohja kapenee.

Kuvaan 38 on kuvattu kysyntäerien kasvuhajotelma WAM-skenaariossa. Vaikutukset kansantuotteeseen ovat monilta osin positiivisia tällä tavoitetasolla, kun lisäinvestoinnit kasvattavat kansantuotetta. Kansantalouden nettovienti kasvaa, kun taloudesta tulee energiaomavaraisempi. Tämä näkyä kuvassa tuonnin positiivisena kasvuvaikutuksena, joka kertoo etenkin energian tuonnin alenemisesta, kuten edempänä nähdään tarkemmin. Viennin kasvuvaikutus on negatiivinen, jonka takana on ennen kaikkea öljyjalosteiden mutta myös teollisuuden viennin lasku. Päästöjen vähennysten lisähinta leikkaa kuitenkin kotitalouksien ostovoimaa, jolloin kulutuskysyntä laskee. Vuoteen 2030 mennessä kulutuskysyntä laskee noin 0,3 prosenttia perusskenaarioon verrattuna ja vuoteen 2050 mennessä noin prosentin. Kun kulutuskysyntä muodostaa lähes puolet kansantuotteesta, aiheutuu tästä vuonna 2030 noin 0,15 prosenttiyksikön negatiivinen kasvuvaikutus ja vuonna 2050 noin 0,7 prosenttiyksikön. Investoinnit kasvattavat kansantuotetta 2020- ja 2040-luvuilla parhaimmillaan saman, reilun 0,7 prosenttiyksikön verran. Kansantuote jää kulutuskysynnän laskun vuoksi hieman alemmalle tasolle WEM-skenaarioon verrattuna, mutta ero on koko tarkastelujakson ajan hyvin pieni. On kuitenkin selvää, että kotitalouksien taloudellinen hyvinvointi laskee hieman WEM-skenaarioon verrattuna. Tätä vaikutusta on kuvattu alla lisää.



Kuva 37. WAM: tarjontaerien kasvuvaikutukset WEM-skenaarioon verrattuna, prosenttiyksikköä.

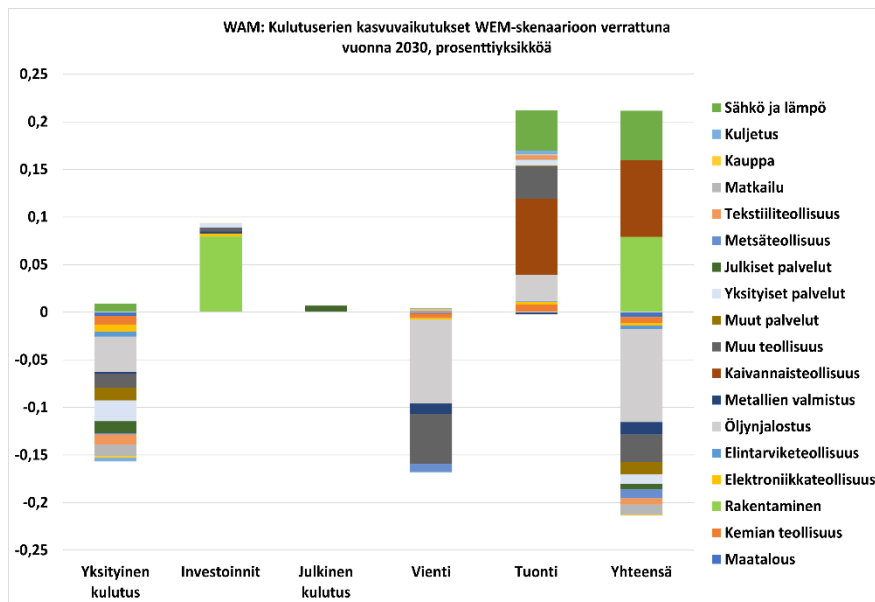


Kuva 38. WAM: kysyntäerien kasvuvaikutukset WEM-skenaarioon verrattuna, prosenttiyksikköä.

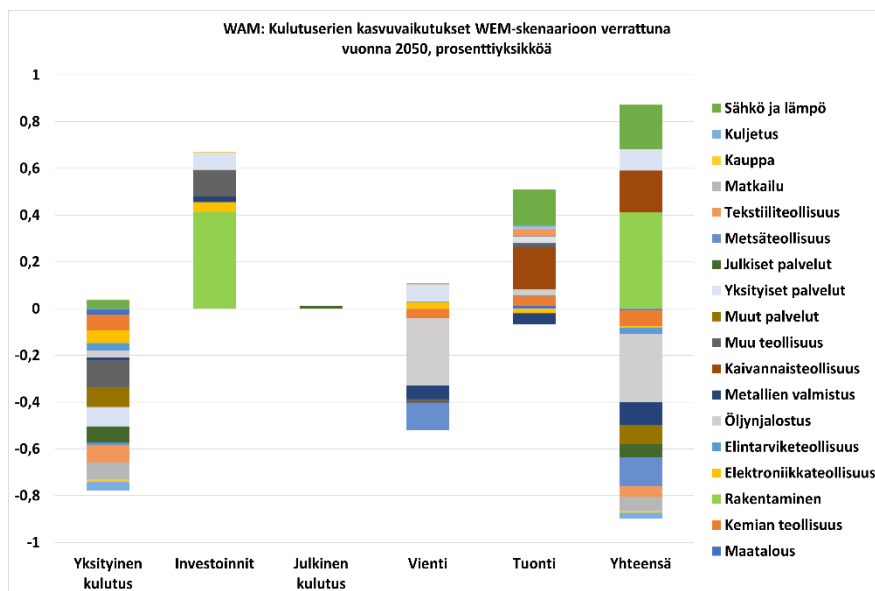
Kuvissa 39 ja 40 kysyntäerien vaikutusta on tarkasteltu vuosina 2030 ja 2050 hyödykeryhmittäin. Kuvista näkyy, että nettoviennin kasvuvaikutus on WEM-

skenaariota suurempi koko tarkastelujakson ajan, jolloin kansantalous pystyy maksamaan energiahuollon uudistamisen vaatimat investoinnit. Suurimmat nettovientiä kasvattavat muutokset syntyvät sähkön ja raakaöljyn tuonnin supistumisen kautta, kun tuonnin supistuminen kasvattaa kansantuotetta, vaikka myös vienti supistuu WEM-skenaarioon nähden. Vuoteen 2050 mennessä kuitenkin etenkin palveluiden ja elektroniikkateollisuuden vienti alkaa kasvaa.

Kuvista näkyy myös, kuinka investointien kasvu lisää rakentamisen kysynnän kasvuvaiikutusta. Kuten yllä nähtiin, tämä heijastuu työllisyyden kasvuna, mutta WAM-skenaarion investoinnit sitovat siinä määrin resursseja, että ne nostavat investointien hintaa muillakin toimialoilla. Tämä on nousevien työvoimakustannusten ohella pääsyy viennin lievään laskuun WEM-skenaarioon verrattuna.

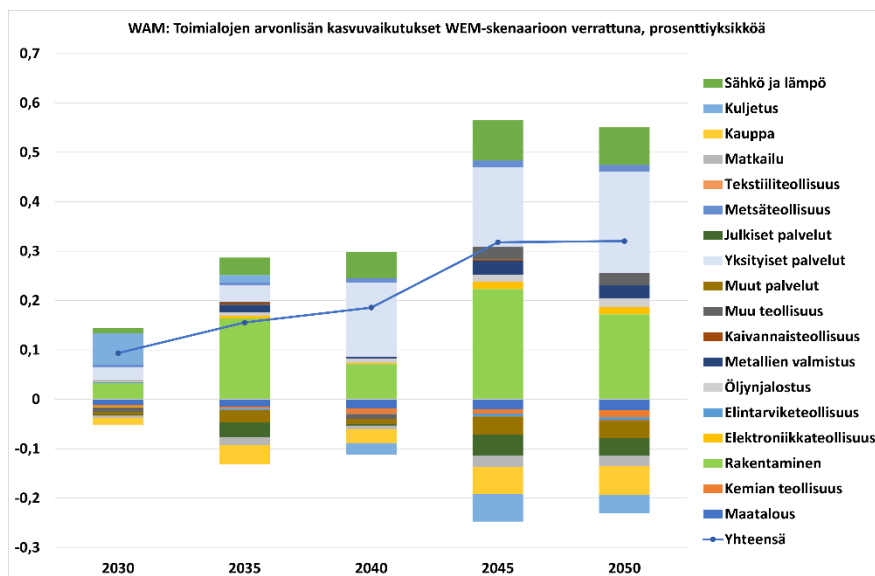


Kuva 39. WAM: kulutuserien kasvuvaikutukset WEM-skenaarioon verrattuna vuonna 2030, prosenttiyksikköä.

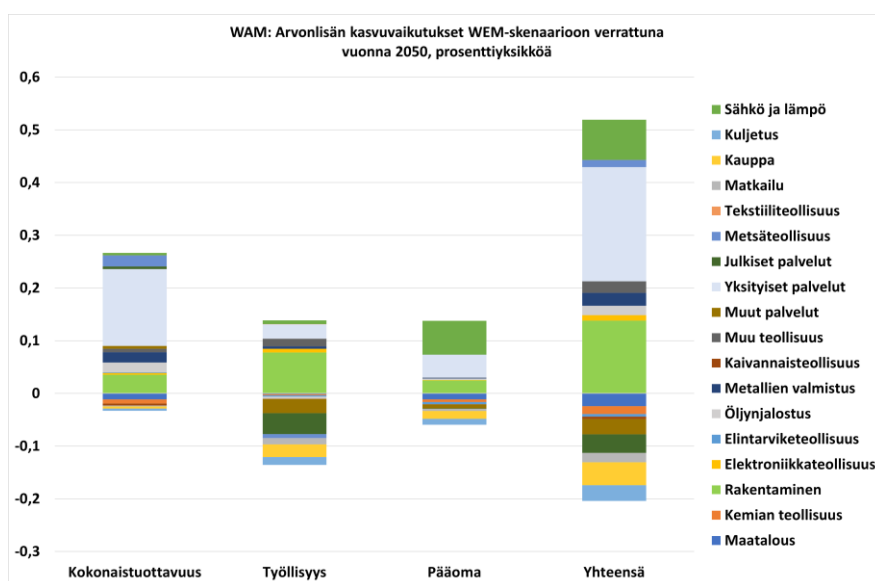


Kuva 40. WAM: Kulutuserien kasvuvaikutukset WEM-skenaarioon verrattuna vuonna 2050, prosenttiyksikköä.

Kuvaan 41 on koottu toimialojen arvonlisän kasvuvaikutukset WEM-skenaarioon verrattuna koko tarkastelujaksolta. Arvonlisään ei kuulu välillisten verojen eikä tuotannon verojen ja tukien vaikutusta, joka, kuten yllä nähtiin, on negatiivinen, siinä missä arvonlisän kasvukontribuutiot ovat positiivisia. Tässäkin tarkastelussa näkyy, että investoinneilla on rakentamisen kautta merkittävä positiivinen vaikutus kansantalouden kasvuun, kun rakentamisen arvonlisän kasvuvaikutus on 0,1–0,2 prosenttiyksikköä WEM-skenaariota enemmän koko tarkastelujakson ajan. Suuri vaikutus syntyy myös sähkön ja lämmön tuotannosta, vuoteen 2050 mennessä noin 0,1 prosenttiyksikköä, jonne suuri osa investoinneista toki kohdentuu. Teollisuudenaloista myös metsäteollisuuden, metallien valmistuksen, elektroniikkateollisuuden ja öljynjalostuksen arvonlisän kasvusta syntyy kansantuotteen lisäkasvua. Ehkä merkittävin rakenteellinen muutos on kuitenkin yksityisten palvelujen arvonlisän kautta syntyvä, positiivinen kasvuvaikutus, joka on yli 0,2 prosenttiyksikköä vuoteen 2050 mennessä. Kuvassa tähän laajaan kategoriaan lukeutuu pankkimaailman ja tietoliikenne- ja liike-elämän palvelujen lisäksi myös kiinteistötoimialat. Näistä jälkimmäiseen kohdistuu suuria, energiatehokkuutta lisääviä investointeja, jotka selittävät osan kasvuvaikutuksesta; eivät kuitenkaan likimainkaan kaikkea. Kuvasta 42 nähdään, että vajaa puolet yksityisten palvelujen kasvuvaikutuksesta syntyy viennistä. Vuoteen 2050 mennessä, yhteiskunnan irtauduttua hiilestä, näyttää palveluvaltaistuminen siis pääsevän uudelleen käyntiin.

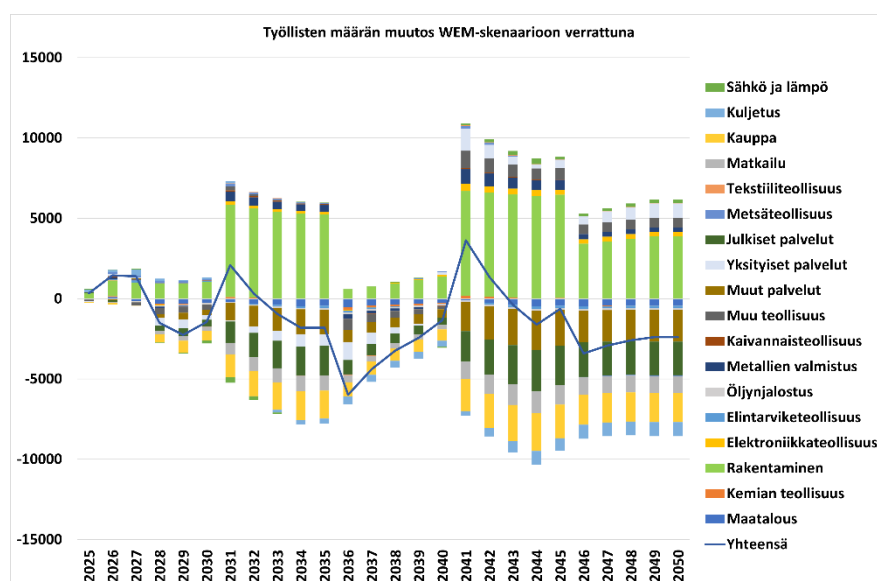


Kuva 41. WAM: toimialojen arvonlisän kasvuvaikutukset WEM-skenaarioon verrattuna vuonna 2050, prosenttiyksikköä.



Kuva 42. WAM: arvonlisän kasvuvaikutukset WEM-skenaarioon verrattuna vuonna 2050, prosenttiyksikköä.

Rakennemuutos näkyy myös työllisyydessä, jonka muutosta WAM-skenaariossa kuvataan kuvassa 43. Kuvasta näkyy, että investoinnit kasvattavat rakentamisen investointeja koko tarkastelujakson ajan, ja 2030- ja 2040-luvulla investointivauhdin kiihtyessä vielä 2020-lukua enemmän. Myös energiantuotannon työllisyys kasvaa. 2020-luvulla palveluvienti kasvaa hieman WEM-skenaariota enemmän, mikä kasvattaa yksityisten palvelujen työllisyyttä. 2030- ja 2040-luvuilla teollisuuden viennin kasvu suuntaa työvoimaa myös siihen teollisuuteen. Kotimaisen kulutuksen lasku näkyy kaupan, matkailun ja kuljetusten työllisyyden laskuna.



Kuva 43. Työllisten määrän muutos WEM-skenaarioon verrattuna.

6.3 Puhtaan energiasiirtymän aluetalousvaikutustarkastelut

Puhtaan energiasiirtymän taloudellisia vaikutuksia on olennaista tarkastella alueellisesta näkökulmasta, sillä siirtymä ei ole maantieteellisesti neutraali prosessi. Uusiutuvan energian tuotannon mahdollisuudet, investointien kohdentuminen ja niistä syntyvät taloudelliset hyödyt vaihtelevat suuresti alueittain riippuen luonnonolosuhteista, olemassa olevasta infrastruktuurista, maankäytöstä sekä paikallisesta elinkeinorakenteesta. Esimerkiksi tuulivoiman tuotantoedellytykset ovat merkittävästi paremmat tietyillä rannikko- ja pohjoisilla alueilla, kun taas aurinkoenergian hyödyntämispotentiaali painottuu hieman eri tavoin. Näin ollen puhtaan energian investoinnit voivat jakautua alueellisesti epätasaisesti, mikä vaikuttaa suoraan siihen, missä työpaikkoja syntyy, miten

alueiden verotulot kehittyvät ja millä alueilla energiantuotannon aluetaloudellinen merkitys kasvaa.

Energiasiirtymä ei kosketa vain energiasektoria, vaan sen vaikutukset ulottuvat laajasti eri toimialoille, kuten teollisuuteen, rakentamiseen ja kuljetuksiin. Uusiutuvan energian hankkeet kytkeytyvät näihin sektoreihin sekä suoraan – esimerkiksi investointien kautta – että epäsuorasti, kun uudet energainfrastruktuurit mahdollistavat uusia liiketoiminta- ja investointimahdollisuuksia. Tämä sektoreiden välinen integraatio muovaa alueiden taloudellista rakennetta ja voi vahvistaa niiden vetovoimaa ja kilpailukykyä. Samalla se voi aiheuttaa siirtymäpaineita sellaisille alueille ja toimialoille, joilla fossiiliin polttoaineisiin perustuva tuotanto on ollut keskeinen osa elinkeinorakennetta.

Alueellisten vaikutusten ymmärtäminen on tärkeää paitsi siksi, että voidaan tunnistaa missä puhtaan energian siirtymä synnyttää kasvua ja hyvinvointia, myös siksi, että siirtymän aiheuttamat muutokset voidaan ennakoida ja niihin voidaan reagoida oikea-aikaisesti. Alueellinen tarkastelu mahdollistaa sen, että politiikkatoimia voidaan suunnitella kohdennetusti, ottaen huomioon alueiden erityispiirteet ja erilaisten siirtymäpolkujen tarpeet. Samalla voidaan tukea oikeudenmukaista siirtymää, jossa hyödyt jakautuvat tasapainoisemmin ja siirtymän kustannuksia ei kasata yksipuolisesti tietyille alueille tai väestöryhmille.

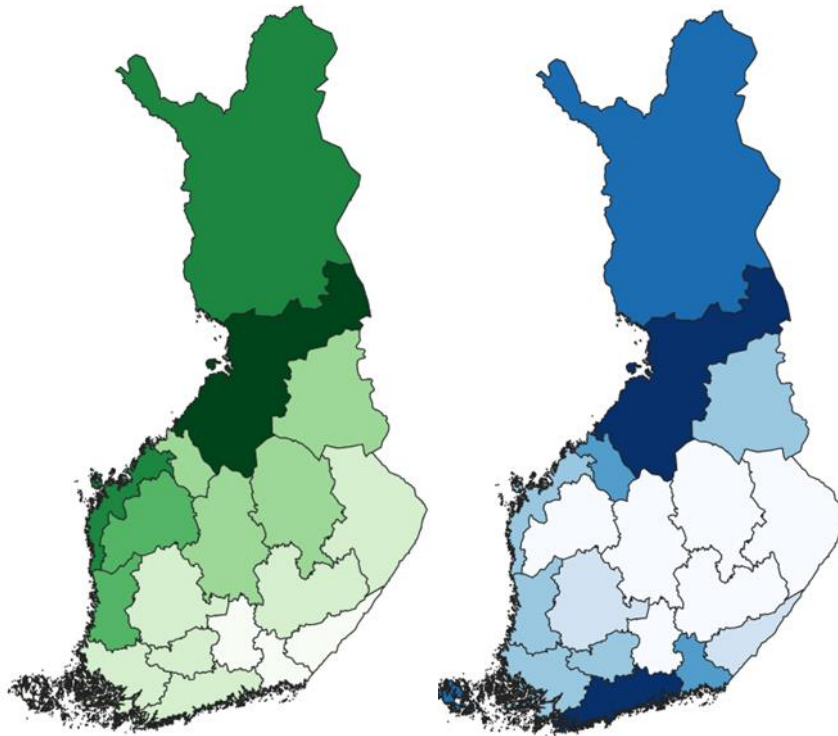
Puhtaan energian siirtymä tarjoaa mittavia mahdollisuuksia taloudellisen uudistumisen ja ilmastotavoitteiden saavuttamisen näkökulmasta. Kuitenkin ilman alueellisesti eriytettyä ymmärrystä voi osa potentiaalista jäädä hyödyntämättä tai siirtymä voi aiheuttaa hallitsemattomia epätasapainotiloja. Siksi alueellisten vaikutusten tarkastelu ei ole ainoastaan hyödyllistä, vaan välttämätöntä kestävän ja osallistavan energiatulevaisuuden rakentamiseksi.

6.3.1 Investointien ja tuotantotoimintojen alueellinen sijoittuminen

Investoinnit sekä uudet tuotantotoiminnot ja energiankulutukset kohdennettiin maakuntiin ja toimialoille Elinkeinoelämän Keskusliiton vihreiden investointien dataikkunan (Elinkeinoelämän Keskusliitto 2025) sekä tuulivoiman ja teollisen mittakaavan aurinkovoiman osalta Suomen uusiutuvat ry:n hankelistauksen avulla (Suomen uusiutuvat 2025d). Sijaintien lisäksi investointien toteutusajankohdat ja investointisummat arvioitiin näiden aineistojen perusteella. Aineistot sisältävät valtaosan julkisesti tiedossa olevista hankesuunnitelmista, mutta tiedot eivät ole täydellisen kattavia muun muassa sijaintien, investointisummien ja toteutusajankohtien suhteen. Tässä tarkastelussa aineistosta hyödynnettiin vain ne hankkeet, joista nämä tiedot olivat olemassa.

Keskeinen elementti tulevaisuuden energiajärjestelmässä on energiaa käyttävien sektoreiden integraatio toisiinsa sähkön tuotannon ja kulutuksen kautta. Uusi sähköntuotanto perustuu pitkälti tuuli- ja aurinkosähkön lisäämiseen, joista maatuulivoimatuotannon kasvu sijoittuu etenkin Pohjois-Pohjanmaalle ja Lappiin sekä muihin pohjanmaan maakuntiin. Merituulivoima yleistyy 2030-luvulla sijoittuen Pohjois-Pohjanmaalle, Pohjanmaalle ja Satakuntaan. Teollisen

mittakaavan aurinkosähköhankkeita suunnitellaan puolestaan tasaisemmin eri puolille Suomea myös eteläiseen ja itäiseen Suomeen, kun taas Lappiin aurinkosähköhankkeet eivät merkittävässä määrin sijoitu. Yhdistetyn tuuli- ja aurinkosähkötuotannon alueellinen jakauma on esitetty kuvassa 44 vasemmalla.



Kuva 44. Tuuli- ja aurinkosähkötuotannon alueellinen jakauma (vasemmalla) ja sähkön käytön kasvun alueellinen jakauma (oikealla). Tummempi väri viittaa suurempaan osuuteen.

Uuden sähköntuotannon oletettiin allokoituvan datakeskusten, lämmityksen, vihreän teräksen ja vedyn tuotannon sähkön käyttöön vihreiden investointisuunnitelmien alueellisen jakauman mukaisesti. Energiankulutuksen oletetaan kasvavan eniten vihreän vedyn tuotannossa ja datakeskuksissa. Mikäli Inkooseen suunnitellun vihreän teräksen tuotantolaitos toteutuu, Uudenmaan sähkön käyttö kasvaa entisestään. Arviointiajanhetkellä aineistossa olleet datakeskukset sijoitettiin Kymenlaaksoon, Uudellemaalle, Kainuuseen, Varsinais-Suomeen ja Etelä-Karjalaan. Vihreän vedyn tuotantoon ja jalostamiseen liittyvä sähkönkäyttö puolestaan allokoitiin hankesuunnitelmien mukaisesti tasaisemmin kaikkialle Suomeen. Kaukolämmön tuotannossa polttoon perustuvaa

lämmöntuotantoa korvataan sähkökattiloilla ja lämpöpumpuilla etenkin maakuntien keskuskaupungeissa. Suuren mittakaavan sähköä käyttävien tuotantotoimintojen lisäksi tieliikenteen sähkönkäyttö kasvaa alueiden ominaispiirteet huomioiden.

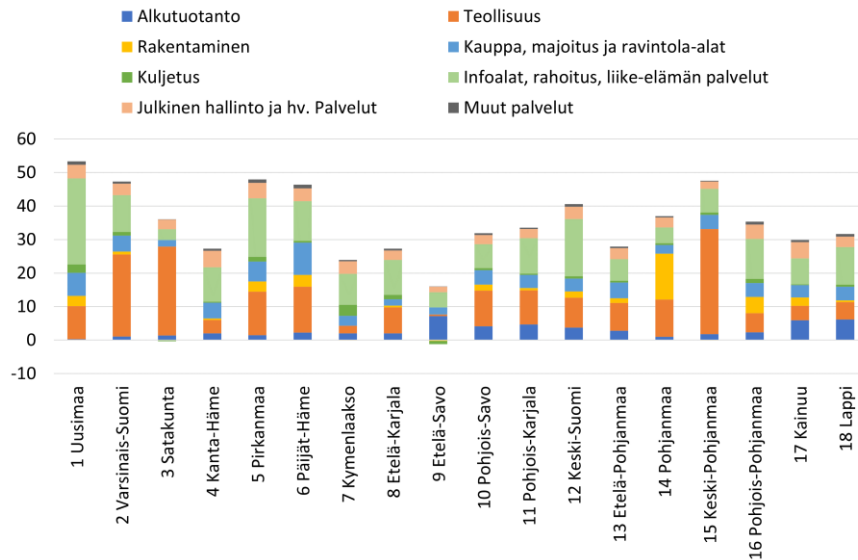
Edellä mainittujen energiaa tuottavien ja kuluttavien investointien ja tuotantotoimintojen lisäksi tarkasteltiin biokaasuhankkeiden, energiavarastojen, biotuotteiden, biojalostamoiden, akkuteknologioiden sekä hiilidioksidin talteenoton hankkeiden alueellista sijoittumista. Biokaasun tuotantosuunnitelmat sijoittuvat maataloustuotannoltaan merkittäviin maakuntiin, kuten Pohjois- ja Etelä-Pohjanmaalle sekä Pohjois-Savoon. Energian varastointi-investoinnit sisältävät sekä sähkön että lämmön varastointihankkeita, joista merkittävimpana pumppuvoimaloiden investointisuunnitelmat Lapissa. Muita pienemmän mittakaavan energiavarastoinvestointeja on suunnitteilla tasaisesti eri puolille Suomea. Biojalostamosuunnitelmat sijoittuvat pääosin pohjoisiin maakuntiin ja akkuteknologiainvestoinnit sijoittuvat Kymenlaaksoon, Pohjanmaalle ja Keski-Pohjanmaalle.

6.3.2 Aluetalouden WEM-skenaario

Aluetaloudellinen skenaario on tuotettu laskennallisilla FINAGE/REFINAGE-tasapainomalleilla, joita on käytetty jo pitkään kansantalouden pitkän aikavälin kehityksen arviointiin. Laskentamalleja on kuvattu useissa julkaisuissa (Honkatukia 2019; 2021; 2024).

Talouden alueellinen WEM-skenaario on laadittu kullekin maakunnalle niiden omista väestö- ja elinkeinorakenteista lähtien, mutta koko kansantalouden tasoisia tuloksia hyödyntäen. Aluetasolla talouskasvun suureen kuvaan vaikuttaa ennen kaikkea väestökehitys, sekä väestön kasvun että sen ikärakenteen kautta. Tässä tutkimuksessa käytetään Tilastokeskuksen alueellista väestöennustetta vuodelta 2021, joka ulottuu vuoteen 2040. Ennusteessa vanhusväestön määrä kasvaa lähivuosikymmeninä selvästi. Tilastokeskuksen mukaan väestön alueellinen keskittyminen jatkuu. Väestöennusteen ennustaa väestön supistumisen jatkuvan monissa maakunnissa. Vuoden 2021 väestöennusteessa väestö ei juurikaan kasva vuoteen 2040 mennessä. Väestönkasvu keskittyy Uudellemaalle ja varsinkin pääkaupunkiseudulle. Uudenmaan lisäksi vain Varsinais-Suomen ja Pirkanmaan väestö ylipäättään kasvaa. Kaikissa maakunnissa vanhusväestön osuus kasvaa.

Alueiden toimialarakenne vaikuttaa alueelliseen kasvupotentiaaliin, koska tarkastelussamme otetaan huomioon toimialojen tuottavuuskasvun historiallisesti suuret erot. Selvimmin nämä erot näkyvät juuri työvoimaintensiivisten julkisten palvelujen ja välituote- ja pääomaintensiivisten vientiteollisuuden ja -palvelujen vaikutuksessa talouskasvuun, jota kuvataan kuvassa 45. Kuvasta näkyy, kuinka esimerkiksi Varsinais-Suomessa teollisuuden vaikutus kasvuun on puolitoistakertainen Uuteenmaahan verrattuna, jossa taas julkiset ja yksityiset palvelut ovat kasvuvaiikutukseltaan suurempia. Useissa Pohjois-Suomen maakunnissa teollisuuden vaikutus kasvuun on selvästi muita toimialoja suurempi.

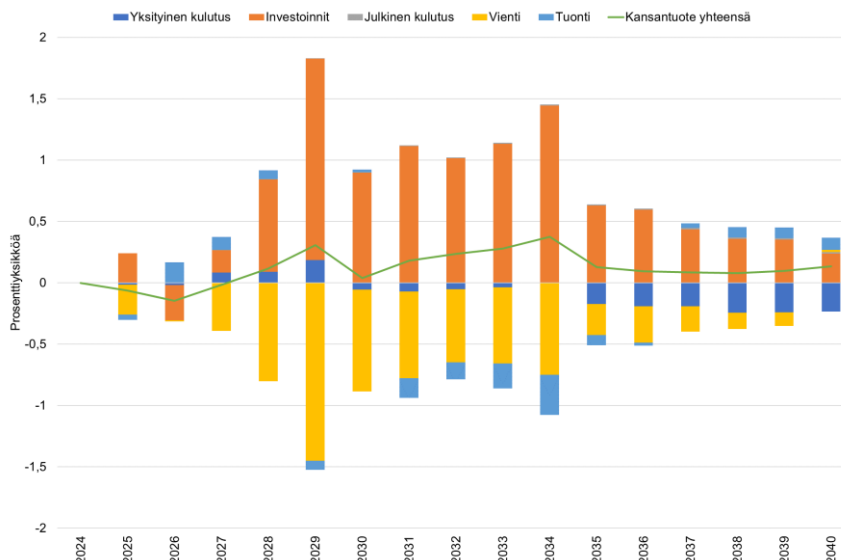


Kuva 45. Toimialojen kasvuvaikutus alueelliseen arvonlisään WEM-skenaariossa vuosina 2024–2040.

6.3.3 Tulokset

WAM-skenaariossa investoinnit sekä uudet tuotantotoiminnot ja energiankulutukset kohdennettiin maakuntiin ja toimialoille Elinkeinoelämän Keskusliiton vihreiden investointien dataikkunan (Elinkeinoelämän Keskusliitto 2025) sekä tuulivoiman ja teollisen mittakaavan aurinkovoiman osalta Suomen uusiutuvat ry:n hankelistauksen avulla (Suomen uusiutuvat 2025d). Sijaintien lisäksi investointien toteutusajankohdat ja investointisummat arvioitiin näiden aineistojen perusteella.

Kuvaan 46 on koottu vaikutukset kansantalouteen kansantuotteen kysyntäerien kasvuhajotelmana. Kasvuhajotelma jakaa kasvun osatekijöihinsä, tässä tapauksessa kysyntäerien kautta syntyviin vaikutuksiin, jotka lasketaan painottamalla osatekijöiden muutoksia niiden osuuksilla. Kuviosta näkyy, että suurimmat vaikutukset syntyvät investoinneista, jotka varsinkin 2030-luvun alkuvuosina ovat huomattavan suuria. Käytetyistä lähteistä johtuen investoinnit on ollut mahdollista kohdentaa vuositasolla, ja siksi niiden vaikutus koko kansantaloudessa poikkeaa hieman koko kansantalouden arviosta.

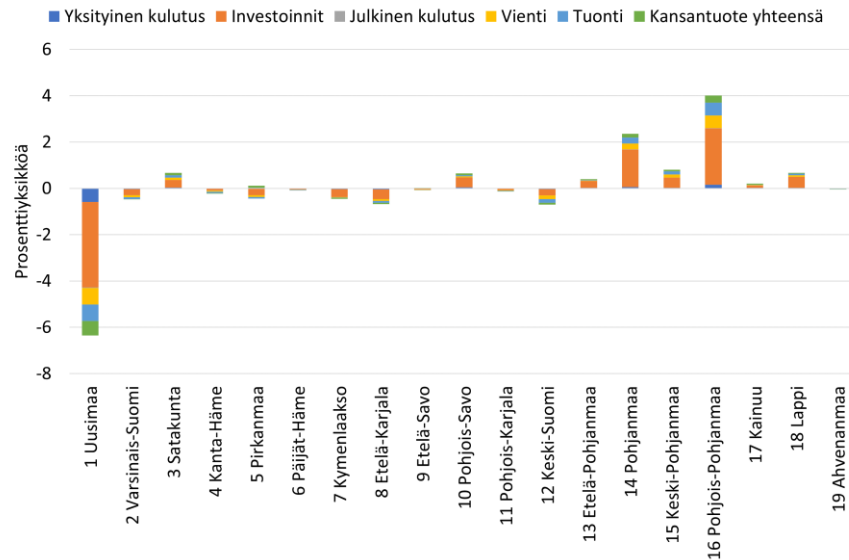


Kuva 46. WAM-skenaarion kysyntäerien kasvuvaiikutukset WEM-skenaarioon verrattuna.

Kokonaiskuva on kuitenkin sama: investoinnit syrjäyttävät muuta toimintaa, koska ne vaativat paljon resursseja, mikä nostaa rakentamisen ja investointien hintaa niilläkin sektoreilla, joille ei kohdistu toimenpiteitä. Siten vienti kasvaa WEM-skenaariota hitaammin, mikä laskee kansantuotteen kasvua enimmillään noin 1,4 prosenttiyksiköllä. 2030-luvun mittaan talouden rakenteet uudistuvat ja tällöin vientikin alkaa elpyä. Kotitalouksien kulutus jää vielä alemmalle tasolle kuin WEM-skenaariossa, mikä laskee kansantuotetta noin 0,2 prosenttiyksiköllä. Kaikkiaan kansantuote kuitenkin kasvaa hieman, noin 0,1 prosenttia WEM-skenaarioon verrattuna.

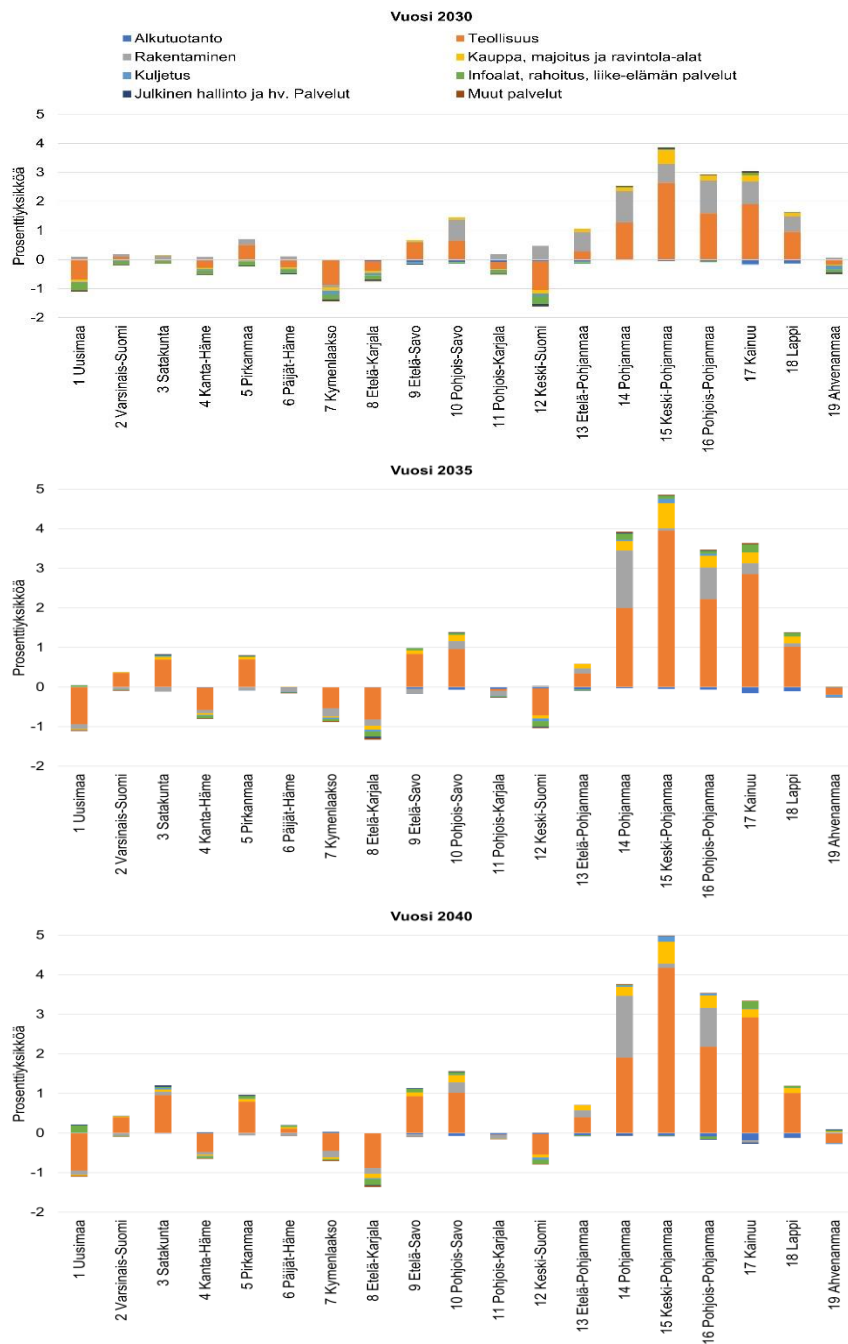
Kuvassa 47 kysyntäerien kasvu on jaettu maakuntien vaikutukseen kunkin kysyntäerän kasvuun. Suurin positiivinen vaikutus syntyy investoinneista biojalostamoihin ja tuulivoimaan, ja siksi Pohjanlahden ja pohjoisen Suomen maakuntien vaikutus kasvuun on positiivinen. Tarkastelussa oletetaan, että investointien vaatima, suuri rakentamisen panos jakautuu koko Suomeen, mutta varsinkin naapurimaakuntiin. Lisäksi oletetaan, että uudet työllisyysmahdollisuudet voivat houkutella työvoimaa muualta Suomesta. Tämä vaikutus hidastaa maassamuuttoa, joka väestöennusteessa kohdistuu lähinnä Etelä- ja Lounais-Suomeen.

Koska investoinnit suuntautuvat suurelta osin muuhun Suomeen, jää Uudenmaan kehitys WEM-skenaariota vaisummaksi. Tästä syystä Uudenmaan kasvuvaiikutus kuviossa on negatiivinen ja näyttäytyy kuviossa suurena maakunnan suuren painoarvon vuoksi. Uudenmaan taloudessa ei kuitenkaan tapahdu näin suuria suhteellisia muutoksia.



Kuva 47. Alueiden kasvuvaikutus kansantuotteen kysyntäeriin WEM-skenaarioon verrattuna vuonna 2040.

Kuvassa 48 on tarkasteltu kasvua aluetalouden näkökulmasta. Kuvioissa on esitetty toimialojen kasvuvaikutus alueellisen arvonlisään WEM-skenaarioon verrattuna. Kuvioista nähdään, että vuosiin 2030 ja 2035 mennessä vaikutukset syntyvät korostuneemmin rakentamisesta, kun investointitahti on kiivaimmillaan. Investointien valmistuessa energiantuotanto ja biojalosteiden valmistus kasvattavat alueellista arvonlisää. Vaikutukset kohdistuvat selvimmin niihin maakuntiin, joissa on tuulivoimapotentiaalia tai kemian- ja metsäteollisuutta, joihin biojalosteiden kasvava tuotanto voi sijoittua.



Kuva 48. Toimialojen kasvuvaihtelu maakuntien arvonlisään suhteessa WEM-skenaarioon vuonna 2030 (yllä), 2035 (keskellä) ja 2040 (alla).

7 Ilmasto- ja energiapolitiikan ympäristövaikutukset (SOVA)

Sampo Soimakallio, Johannes Lounasheimo, Johanna Niemistö, Antti Rehunen, Niko Karvosenoja, Mikko Savolahti, Ville-Veikko Paunu, Paula Kivimaa, Marja Sivonen, Maija Faehnle, Laura Sokka, Kari-Matti Vuori, Martin Forsius & Tanja Myllyviita, Syke
Mari Kivinen, Jonna Tirroniemi, Antti Ojala, Tuija Vähäkuopus, Jaana Jarva, Taina Karvonen, Lauri Ikkala & Teppo Arola, GTK

Globaali väestönkasvu ja elintason nousu aiheuttavat yhä merkittävämpää riskiä luonnon monimuotoisuuden vähenemiselle ja ympäristön pilaantumiselle. Kansainvälisen luonnonvarapaneelin (UNEP 2024) arvion mukaan yli 60 prosenttia globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä ja yli 90 prosenttia luontokadosta aiheutuu materiaalien, polttoaineiden ja ruoan tuotannosta ja prosessoinnista. Luonnonvarapaneelin ennusteen mukaan aikaisemman kehityksen jatkuessa samankaltaisena, tulee neitseellisten luonnonvarojen, mukaan lukien fossiiliset polttoaineet, biomassa, metallit ja mineraalit, otto globaalisti kasvamaan edelleen lähes 60 prosenttia eli 160 miljardiin tonniin vuoteen 2060 mennessä (UNEP 2024).

Rockström ym. (2009) määrittelivät yhdeksän planetaarista rajaa, jotka ovat ilmastomuutos (hiilidioksidipitoisuus ja säteilypakote), luontokato (sukupuutot ja ekosysteemien tila), otsonikato stratosfäärissä, valtameren happamoituminen, ravinnekuorma, muutokset maankäytössä (metsäkato), makean veden kulutus, ilmakehän pienhiukkaset, ja vuodesta 2023 lähtien myös kemiallinen saastuminen (esim. mikromuovit, orgaaniset saasteet). Rajoja on tarkasteltu kolme kertaa, ja vuonna 2009 todettiin kolmen planetaarisista rajoista ylitetyn (Rockström ym. 2009). Viisi vuotta myöhemmin jo neljä rajoista (Steffen ym. 2015) ja vuonna 2023 julkaistussa arvioissa kuusi rajoista oli ylittynyt (Richardson ym. 2023). Tällä hetkellä vain otsonikadon, makean veden kulutuksen ja pienhiukkasten planetaariset rajat ovat ylittämättä.

Ilmastomuutoksen hillitseminen sekä siirtyminen kestäviin ja puhtaampiin energiajärjestelmiin ovat ratkaisevia tekijöitä ympäristön, talouden ja yhteiskuntien hyvinvoinnin edistämiseksi. EU tavoittelee ilmastoneutraaliutta vuoteen 2050 mennessä ja on sitoutunut vähentämään nettokasvihuonekaasujen päästöjä vuoden 1990 tasosta vähintään 55 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Euroopan

komissio (2024) on ehdottanut vuodelle 2040 päästöjen vähentämistavoitteeksi 90 prosenttia vuoteen 1990 verrattuna. EU:n vihreän kehityksen ohjelma (The European Green Deal 2019–2024) sekä helmikuussa 2025 julkaistu uuden komission Puhtaan teollisen kehityksen ohjelma (Clean Industrial Deal) pyrkivät ohjaamaan toimia kohti vähähiilistymistä (Euroopan komissio 2025a; 2025b; 2025c). Puhtaan teollisen kehityksen ohjelmassa tavoitteena on erityisesti myös EU:n kilpailukyvyyn nostaminen ja keskiössä energiavaltaisen teollisuuden, cleantech-sektorin ja kiertotalouden edistäminen. Kohtuuhintainen energia, puhtaiden tuotteiden kysynnän lisääminen ja puhtaan siirtymän rahoittaminen, kiertotalous ja raaka-aineiden saatavuus, luotettavat globaalit kumppanit sekä osaaminen ja laadukkaat työpaikat ovat ohjelman keskeisiä suuntaviivoja.

Suomen ilmasto- ja energiapolitiikan keskeisiä tavoitteita ovat kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen ja hiilineutraalius kansallisen ilmastolain (423/2022) mukaisesti, uusiutuvan energian tuotannon lisääminen, energiatehokkuuden parantaminen muun muassa sähköistämällä sekä energian toimitusvarmuuden turvaaminen. Nykyisen hallituksen energia- ja ilmastostrategian ytimessä ovat muun muassa puhtaan energian ratkaisujen edistäminen sekä kilpailukyvyyn parantaminen luvitusta sujuvoittamalla (Valtioneuvosto 2023a).

Ilmastotavoitteiden saavuttamisella on lähtökohtaisesti myönteisiä ympäristö- ja terveysvaikutuksia, kun ilmastomuutoksen haitallisia vaikutuksia, esimerkiksi lämpötilan nousua, sään ääri-ilmiöitä kuten myrskyjä, tulvia, helleaaltoja, kuivuutta, kylmyysjaksoja, merenpinnan nousua tai elinympäristöjen häviämistä, saadaan hillittyä. Vaikka Suomen osuus maailman ilmastopäästöistä on absoluuttisesti vähäinen, aiheuttaa Suomi asukasta kohden laskettuna, sekä alueellisesti että kulutusperusteisesti määritettynä, selvästi maailman keskiarvoa enemmän ilmastopäästöjä (Global Carbon Atlas 2025) ja lisäksi Suomen bruttokansantuote asukasta kohden on yksi maailman suurimmista. Suomen ilmastotavoitteiden saavuttaminen on osa globaalin yhteisön pyrkimyksiä saavuttaa Pariisiin ilmastopöytäkirjan tavoitteet.

Ilmastotavoitteiden saavuttaminen edellyttää merkittäviä muutoksia materiaalien ja energian tuotannon ja kulutuksen tapoihin. Näiden muutosten toteuttaminen vaatii huomattavia investointeja, rakentamista ja luonnonvarojen käyttöä, joilla on merkittäviä vaikutuksia ympäristöön, ihmisiin ja talouteen. Käyttöön otettavat toimet ja teknologiat voivat aiheuttaa haitallisia vaikutuksia erityisesti luonnon monimuotoisuuteen, metsien hiilinieluihin, vesistöihin, ilmaan ja maaperään sekä ihmisten elinoloihin, hyvinvointiin ja viihtyvyyteen. Osa vaikutuksista kohdistuu Suomen rajojen ulkopuolelle. Aiheutuviin vaikutuksiin voidaan vaikuttaa erilaisin ohjauskeinoin, kuten verojen, tukien, normiohjauksen ja informaatio-ohjauksen avulla. Toimien ja toimenpiteiden suunnittelulla ja vaikutusten hallinnalla voidaan vaikuttaa niiden hyväksyttävyyteen, koettuun sosiaaliseen ja taloudelliseen oikeudenmukaisuuteen ja edistää yhteiskuntakehitystä kohti hiilineutraaliutta ja kokonaiskestävyyttä.

Eri toimiin liittyvien vaikutusten maantieteellinen kohdentuminen (paikallinen, alueellinen, valtakunnallinen, rajat ylittävä tai globaali) ja aikajänne vaihtelevat

merkittävästi. Maantieteellisesti vaikutukset voivat ulottua hyvin pistemäisistä paikallisvaikutuksista valtakunnallisiin ja myös Suomen maantieteellisten rajojen ulkopuolisiin seurauksiin. Yhdelle kohderyhmälle myönteinen vaikutus voi samanaikaisesti olla toiselle kohderyhmälle kielteinen. Toimenpiteiden aikajänne voi ulottua lyhytkestoisista vaikutuksista aina seuraaviin sukupolviin saakka ulottuviin vaikutuksiin, ja seuraukset voivat olla kertaluonteisia, toistuvia tai pysyviä.

Ilmastotoimien hyödyllisten ja kielteisten vaikutusten välinen suhde kytkeytyy myös luonnon monimuotoisuuden ylläpitoon ja suojelemiseen. Toimien kohdistamisella ja suunnittelulla voidaan joko edistää asetettua tavoitetta tai tuottaa sitä heikentäviä sivuvaikutuksia. Vaikutus toimii myös niin sanotun takaisinkytkennän (feedback loop) tavoin, jolloin luonnon ja ekosysteemien tasapainon säilyttäminen hillitsee ilmastomuutosta ja edistää sopeutumista jo tapahtuneisiin muutoksiin ja päinvastoin. Kansainvälinen luontopaneeli IPBES ja hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC ovatkin todenneet, että ilmastomuutos ja luontokato on ratkaistava yhdessä (Pörtner ym. 2021).

Energia- ja ilmastostrategian sekä keskipitkän aikavälin ilmastopoliitiikan suunnitelman valmistelua tukevia KEITO-hankkeen taustalaskelmia sekä niiden avulla tunnistettuja mahdollisia vaikutuksia energiajärjestelmään sekä kasvihuonekaasupäästöihin ja -poistumiin on kuvattu tämän raportin luvuissa 2–5 sekä kansantalouden kehitystä luvussa 6. Tässä luvussa käsitellään edellä mainittujen arvioiden sekä viimeaikaisten tutkimustulosten ja selvitysten pohjalta arvioituja mahdollisia SOVA-lain mukaisia vaikutuksia ympäristöön ja ihmisten elämään. Tarkastelussa huomioidaan nykytila ja oletettu kehitys sekä jo päätettyjen toimien mukaisessa kehitysskenaariossa (WEM) että tarkasteltujen uusien toimien mukaisessa skenaariossa (WAM). Luvussa 7.11 kuvataan erikseen keskeisimpien yksittäisten teknologioiden kestävyysnäkökulmia ja luvussa 7.12 kootusti WAM-toimien vaikutuksia.

SOVA-arvioinnissa huomioitavia tekijöitä, kielteisten vaikutusten aiheuttajia sekä esimerkkejä kielteisten vaikutusten vähentämiskeinoista on koottu yleisesti muun muassa edellisen ilmasto- ja energiastrategian SOVA-arvioinnin yhteydessä (Soimakallio ym. 2021, mm. taulukko 1 ja liitteen 1 taulukot). Ilman tarkempia konkreettisia määrittelyjä tai linjauksia uusista energia- ja ilmastopoliittisista toimenpiteistä, voitiin SOVA-arviointi laatia tässä yhteydessä lähinnä suuntaa antavana ja enimmäkseen laadullisena arviona mahdollisista vaikutuksista.

7.1 Päästövaikutukset Suomen rajojen ulkopuolella

Suomen kansantalouden tuotantotoiminta aiheuttaa merkittäviä ilmastopäästöjä ja luontovaikutuksia globaalisti. Vaikutuksia Suomen rajojen ulkopuolella muodostuu paitsi Suomeen tuotavien lopputuotteiden valmistusketjuissa, myös välillisesti kotimaisten tuotteiden ja palveluiden tuotannossa käytettävien ulkomaisten raaka-aineiden ja välituotteiden valmistuksessa.

Ulkomailla aiheutuneiden päästöjen määrään vaikuttavat Suomen kansantalouden käyttämien tuotteiden ja palveluiden rakenne, määrä sekä tuotteiden ja palveluiden tuotannon päästöintensiteetti¹⁶ eri maissa. Kulutuksen ohjaaminen alhaisemman päästöintensiteetin tuotteisiin ja palveluihin vähentää kansantalouden aiheuttamaa elinkaarista kuormitusta. Esimerkiksi kasvipohjaisten tuotteiden tai monien palveluiden päästöintensiteetti on yleensä pienempi kuin lihatuotteiden tai palveluiden käyttöä vastaavien tavaroiden valmistuksen.

Energiajärjestelmä muuttuu tulevaisuudessa merkittävästi, mikä vaikuttaa olennaisesti päästöihin myös Suomen rajojen ulkopuolella. KEITO-hankkeessa arvioitiin ympäristölaajennetulla panos-tuotosmallilla (ENVIMAT) energian tuotannon ja kulutuksen muutosten vaikutuksia WEM-skenaariossa vuonna 2035.¹⁷ Vuonna 2019 Suomen kansantalouden aiheuttamat, siis Suomessa ja maan rajojen ulkopuolella muodostuneet, elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat noin 126 Mt CO₂-ekv. (Salo ym. 2023). Kasvihuonekaasuinventaariossa raportoituihin Suomen alueellisiin kasvihuonekaasupäästöihin (pl. LULUCF-sektori)¹⁸ verrattuna päästöt olivat noin 2,4-kertaiset. Tuonnin osuus päästöistä oli 54 % (noin 68 Mt CO₂-ekv.), ja vientituotteiden tuotannon aiheuttamat päästöt olivat 55 Mt CO₂-ekv.¹⁹

Energiajärjestelmän muutosten myötä kansantalouden elinkaariset päästöt ovat vuonna 2035 WEM-skenaariossa arviolta noin 84 Mt CO₂-ekv. (-34 % vrt. 2019), josta kotimaisten toimintojen osuus on 31 % (27 Mt CO₂-ekv.) ja tuonnin osuus 69 % (58 Mt CO₂-ekv.). Viennin päästöt vähenevät WEM-skenaariossa 41 Mt CO₂-ekv.:iin. Kun Suomessa syntyneistä päästöistä vähennetään kansainvälisen lento- ja laivaliikenteen polttoaineiden käytön päästöt, n. 5 Mt CO₂-ekv., vastaa ENVIMAT-mallinnuksen tulos (21,8 Mt CO₂-ekv.) TIMES-VTT-mallilla lasketun WEM-skenaariion päästöjä (ks. luku 3.3.1). WAM-skenaariolle ei tehty erikseen ENVIMAT-analyysiä. Erot energian tuotannossa ja kulutuksessa ovat WEM:n ja WAM:n välillä hyvin pieniä. Keskeinen ero on CCS-tekniikan käyttöönotto WAM-skenaariossa.

Vaikka Suomen ulkopuolella syntyneet päästöt vähenevät, niiden osuus koko kansantalouden päästöistä kasvaa merkittävästi. Tämä saattaa kuitenkin olla lievä yliarvio, koska mallinnuksessa oletettiin ulkomaisen tuotannon

¹⁶ Päästöintensiteetti kuvaa kuinka paljon kasvihuonekaasupäästöjä tuotteeseen tai palveluun kulutettu euro aiheuttaa (yksikkönä esimerkiksi kg CO₂-ekv./€). Energiajärjestelmän muutokset vaikuttavat etenkin energiaintensiivisten tuotteiden päästöintensiteettiin.

¹⁷ ENVIMAT-mallin lähtötietoja muutettiin syöttämällä TIMES-VTT-laskennan mukaiset tiedot (ks. luvut 3.1 ja 3.2) sähköntuotannon, kaukolämmön, teollisuuden, liikenteen ja työkoneiden polttoaineiden käytöstä ja eri toimialojen energiankulutuksista WEM-skenaariossa vuonna 2035 ja niitä vastaavat monetaariset muutokset. Talouden rakenteeseen ja volyymeihin ei tehty muutoksia.

¹⁸ Suomen kasvihuonekaasuinventaari (Tilastokeskus 2025a) mukaan päästöt olivat 53,1 Mt CO₂-ekv.

¹⁹ Luvut poikkeavat hieman raportoiduista (Salo ym. 2023) ENVIMAT-malliin tehtyjen päivitysten takia.

ympäristövaikutusten pysyvän ennallaan. Toisaalta IEA:n suhteellisen hyvin WEM:iä vastaavan STEPS-skenaarion mukaan energiasektorin globaalit päästöt ovat vuonna 2035 jokseenkin samalla tasolla kuin vuonna 2019 (IEA 2024).

Vientituotteiden ja -palveluiden tuotanto aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä Suomessa, mutta ne voivat korvata runsaspäästöisempiä tuotteita ja palveluita kohdemaissa. Syken hiilikädenjälkilaskennan tulosten perusteella Suomen viennin hiilikädenjälki vuonna 2019 oli 13,1 Mt CO₂-ekv., kun laskennassa oletettiin, että suomalaiset tuoteryhmät korvaavat eri markkina-alueilla vastaavia tuoteryhmiä eri alkuperämaiden vienti- ja tuotanto-osuuksien mukaisesti (Karhinen ym. 2025). Kädenjälki on laskettu vähentämällä Suomen viennin hiilijalanjälki vaihtoehtoisten tuotteiden hiilijalanjäljestä. WEM-skenaariossa viennin päästöt vähenevät noin neljänneksellä. Viennin kädenjäljen muutoksen suuruus ja suunta riippuvat siitä, miten kohdemaissa kulutettujen vaihtoehtoisten tuotteiden tuotannon päästöt kehittyvät suhteessa Suomen viennin päästöjen muutokseen.

Liikenteen sähköistyminen kasvattaa päästöjä Suomen rajojen ulkopuolella, koska akkujen vuoksi sähköautojen valmistuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat polttomootoriautoja suuremmat. WEM- ja WAM-skenaarioissa Suomessa on runsaat 1,3 miljoonaa täyssähköautoa vuonna 2035. Tämä aiheuttaisi karkeasti arvioiden noin 4,6 miljoonan CO₂-ekvivalenttitonnin lisäpäästöt polttomootoriautoihin verrattuna, pääosin ulkomailla. Suomessa on kuitenkin kehittymässä olevaa akkuteollisuutta, ja osa Suomeen tuotavista tai täällä valmistetuista sähköautoista voidaan tulevaisuudessa varustaa kotimaisella akulla.

Sähköautojen yleistyessä bensiinin ja dieselin käyttö vähenee, mikä vähentää raakaöljyn tuotannon ja kuljetusten päästöjä Suomen rajojen ulkopuolella, vuoteen 2035 mennessä arviolta noin 2,5 miljoonalla tonnilla. Liikenteen sähköistyminen vaikuttaa kuitenkin päästöihin erityisesti autojen käytön aikaisten päästöjen kautta, jotka vähenevät moninkertaisesti autojen valmistuksen kasvaneisiin päästöihin nähden (ks. myös luku 7.11.8).

Tuontibiopolttoaineiden raaka-aineet ja saatavuus ovat vahvasti kytköksissä eri materiaalien taloudelliseen hyödynnettävyyteen, jota erityisesti biopolttoaineiden kestävyyskriteerien ja raaka-aineiden kysynnän kehittyminen ohjaavat (Searle & Malins 2015, Chum ym. 2011). Tuontibiopolttoaineiden tuotannon ja kuljetuksen kasvihuonekaasupäästöjä muodostuu Suomen rajojen ulkopuolella. Uusiutuvan energian direktiivin (RED; renewable energy directive) uusin versio RED III (EU 2023/2413) asettaa kriteerit kestävyys osoittamisesta biopolttoaineille, bionesteille, biomassapolttoaineille, muuta kuin biologista alkuperää oleville uusiutuville (RFNBO; renewable fuels non-biological origin,) polttoaineille ja kierrätetyille hiilipitoisille polttoaineille. Vaikka nämä niin sanotut kestävyyskriteerit voivat osaltaan edesauttaa vähäpäästöisempien biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden tuotantoa, jäävät esimerkiksi raaka-aineen tai sen tuotantoon käytettävän maa-alan kilpailusta aiheutuvat epäsuorat vaikutukset ja myös maankäytön suorat hiilinieluvaiikutukset kriteerien ulkopuolelle (Soimakallio & Koponen 2011). Nämä päästöt voivat olla merkittäviä korvattavien fossiilisten polttoaineiden elinkaariin päästöihin verrattuna (Soimakallio ym. 2009).

Suomeen mahdollisesti tuotavien uusiutuvien ei-biologista alkuperää olevien synteettisten polttoaineiden (RFNBO) tuotanto aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä Suomen rajojen ulkopuolella. Kun vety tuotetaan RED III -direktiivin (EU 2023/2413) mukaisesti elektrolyysillä uusiutuvaa energiaa käyttämällä ja tarvittava hiili otetaan ilmakehästä tai CCU/BECCU-teknologialla, jäävät RFNBO:n tuotannon suorat päästöt kuitenkin hyvin mataliksi fossiilisiin verrokkipolttoaineisiin nähden. EU:n delegoidun säädöksen (EU 2023/1185) mukaan kasvihuonekaasupäästövähennyksen tulee olla vähintään 70 prosenttia fossiiliseen vaihtoehtoon verrattuna. Markkinamekanismien kautta aiheutuvat epäsuorat vaikutukset voivat kuitenkin muodostua merkittäviksi, mikäli tuotantoenergiaksi kulutettu uusiutuva energia hidastaa uusiutuvan energian käyttöä muissa kohteissa.

RED III:n mukaan RFNBO-polttoaineiden osuus jäsenmaiden teollisuudessa loppukäyttämästä vedystä tulee olla vähintään 42 % vuoteen 2030 ja 60 % vuoteen 2035 mennessä. Direktiivin toimeenpano, ja toisaalta RFNBO:n tuominen liikennepolttoaineiden jakeluvelvoitteen piiriin (velvoitetaso 1,5 % käytetyistä liikennepolttoaineista vuosina 2028–2029 ja 4 % vuoden 2030 jälkeen) voivat lisätä myös kotimaisia vetyinvestointeja. Vedyn käyttö liikenteen polttoaineena lisääntyy WEM- ja WAM-skenaarioissa vuoden 2030 jälkeen, erityisesti WAM-skenaariossa. Skenaariomallinnuksissa on oletettu, että tarvittava vety tuotetaan kotimaassa, mutta toisaalta myös, että tuotettu vety myös kulutetaan kotimaassa.

Suomen ilmastopolitiikan maan rajoista riippumattomiin päästövaikutuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat yllä käsiteltyjen teemojen lisäksi päästökauppa ja päästöoikeudet/-yksiköt, hiilivuoto ja hiilikädenjälki. EU:n päästökaupan ohjauksessa oleviin kasvihuonekaasupäästöihin kohdistuvat toimet vaikuttavat päästöoikeuksien kysyntään ja tarjontaan. Suomen päästökauppasektorin päästömuutokset voivat tällä tavoin vähentää tai lisätä päästöjä muualla, ja toisaalta muissa EU-maissa tehdyt toimet vaikuttavat tätä kautta Suomeen. Vaikutuksia kuitenkin hillitsee vuonna 2019 käyttöön otettu markkinavakausvaranto, jonne ylimääräisiä päästöoikeuksia otetaan talteen ja poistetaan markkinoilta tai vapautetaan käyttöön/huutokaupattavaksi tarvittaessa. Kokonaisuudessaan EU:n päästökaupan alaiset päästöt vähenevät, mikä vähentää myös tuontituotteisiin sitoutuneita päästöjä. Päästökatto alenee 2023 uudistetun päästökauppadirektiivin (EU 2023/959) mukaisesti 4,3 % vuodessa jaksolla 2024–2027 ja 4,4 % vuodessa jaksolla 2028–2030. Lisäksi päästöoikeuksien määrään tehdään kaksi kertaluontoista leikkausta vuosina 2024 ja 2026 niin, että vuonna 2030 päästökaupan alaiset päästöt ovat 62 % pienemmät kuin vuonna 2005. Päästökauppasektorin toimet ja päästökehitys voivat vaikuttaa päästöjen ja muiden ympäristövaikutusten kehittymiseen tulevien päästökauppaa koskevien päätösten myötä sekä päästökaupan sisällä että epäsuorasti sen ulkopuolisilla sektoreilla ja EU:n ulkopuolella.

Vuonna 2027 käyttöön otettavan polttoaineiden päästökaupan (ETS2) myötä merkittävä osa taakanjakosektorin päästöistä siirtyy eurooppalaiseen päästökauppajärjestelmään nykyisen, laitoksia sekä lento- ja meriliikennettä koskevan ETS1:n rinnalle. Valmisteverovelvollisia toimijoita koskevan ETS2:n

soveltamisalaan kuuluvat liikenne, rakennusten erillislämmitys, ETS1:n ulkopuolinen energiantuotanto, teollisuus ja rakentaminen sekä kansallisella päätöksellä lisäksi maa- ja metsätalous, huviveneily ja tietyiltä osin muu vesiliikenteen käyttöön jaeltu polttoaine. Päästövaikutukset maan rajojen ulkopuolella ovat ETS2-järjestelmän kautta todennäköisesti pienet.

Kasvihuonekaasupäästöjen siirtymistä EU:n regulaatiokehikon sisällä syntyy päästökaupan ohella päästöoikeuksien ostamisesta ja myymisestä jäsenmaiden välillä. Taakanjakosektorin ja maankäyttösektorin velvoitteisiin pääsemiseksi EU-maat voivat tarvittaessa ostaa vuotuisia päästöoikeuksia (AEA; annual emission allocations) ja LULUCF-yksiköitä toisilta jäsenmailta, joilla on ylijäämää. Jos Suomi hankkii päästöyksiköitä, siirtyy päästöjä toisista jäsenmaista Suomeen ja päinvastoin. Kansallisten Suomen ilmastolaissa määriteltyjen tavoitteiden täyttämiseksi Suomi voi mahdollisesti hankkia Pariisin ilmastositomuksen artikla 6:n mukaisia kansainvälisiä päästöyksiköitä (ITMO; internationally transferred mitigation outcome), ilmastolain tulevasta tulkinnasta ja mahdollisista muutoksista riippuen. Säännöt edellyttävät kaksoislaskennan estoa (jos maa A siirtää päästövähennyksen maalle B, sen on vähennettävä se omista laskelmistaan), läpinäkyvyyttä ja raportointia (ITMO-siirrot ilmoitetaan kansainväliseen rekisteriin ja osaksi maiden ilmastosuunnitelmia (NDC; nationally determined contributions)).

EU:n ja Suomen ilmastopolitiikkaan voi myös liittyä riski niin sanotusta hiilivuodosta, jolloin tuotantoa siirtyy kevyemmän sääntelyn maihin. Tämä voi johtaa jopa päästöjen kasvuun globaalisti. Hiilivuodon riski ja vaikutusten laajuus riippuvat pitkälti globaalin ilmastopolitiikan tasosta sekä kansainvälisen kaupan ja investointien kehityksestä. Erityisen alttiita hiilivuodolle ovat energaintensiiviset teollisuuden toimialat, kuten sementti-, teräs-, puunjalostus- ja alumiiniteollisuus (Syri ym. 2013).

EU on pyrkinyt ehkäisemään hiilivuotoa jakamalla päästökauppajärjestelmässä ilmaisia päästöoikeuksia energiantensiivisille teollisuuden aloille. Toukokuussa 2023 astui voimaan asetus (EU 2023/956) hiilirajamekanismista (CBAM; Carbon Border Adjustment Mechanism), joka korvaa asteittain päästökaupan ilmaisjaon valituilla sektoreilla. Hiilirajamekanismia sovelletaan EU:n ulkopuolelta tuotaviin CBAM-tavaroihin, joihin lukeutuvat esimerkiksi tietyt alumiini- ja sementtituotteet, lannoitteet, rauta- ja terästuotteet, sähkö ja vety. Maahantuojien on raportoitava näiden tavaroiden päästöistä komissiolle jo siirtymäajalla lokakuusta 2023 lähtien. Vuodesta 2026 alkaen CBAM-tavaroiden tuonti on luvanvaraista. Hiilirajamekanismin EU:n ja Suomen tuontia vähentävät vaikutukset, erityisesti mekanismin muodostaman tullin piirissä oleville tuotteille, on arvioitu merkittäviksi, mutta kansantaloudelliset vaikutukset ja päästövaikutukset puolestaan vähäisiksi (Kuusi ym. 2020, Kaitila, ym. 2022).

Empiiristen tutkimusten perusteella EU päästökaupan vaikutukset hiilivuotoon ovat olleet tähän mennessä varsin pieniä (Venmans ym. 2020, Verde 2020, Dechezleprêtre ym. 2022). Nämä tutkimukset perustuvat kuitenkin EU:n päästökaupan I- ja II-vaiheisiin, jolloin päästöoikeuden hinnat olivat verrattain alhaisia, ja siten tulosten soveltaminen WEM- ja WAM-skenaarioissa oletettuihin ETS-hintoihin on epävarmaa.

Suomi on pieni toimija globaalissa taloudessa, mutta sen ilmastopoliittiset päätökset voivat vaikuttaa epäsuorasti muiden maiden päästökehitykseen, erityisesti osana EU:ta. Fossiilisten polttoaineiden kulutuksen väheneminen Suomessa tai EU:ssa ei automaattisesti tarkoita, että ne jäisivät käyttämättä maailmanlaajuisesti. Vähentynyt kysyntä voi laskea maailmanmarkkinahintoja, lisätä tarjontaa toisaalla ja johtaa käytön lisääntymiseen tarkastellun politiikka-alueen ulkopuolella (Rajagopal & Plevin 2013).

Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentyminen EU:ssa ja Suomessa voi toisaalta johtaa tuotannon vähenemiseen globaalisti, jolloin polttoaineiden polton päästöjen lisäksi vähenevät myös niiden tuotannon, kuljetusten ja jalostuksen päästöt. Näiden arvoketjuun liittyvien päästöjen on arvioitu olevan noin 5–20 % fossiilisen polttoaineen elinkaari päästöistä (Frischknecht ym. 2007 lähteinen).

7.2 Kulutuksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt

Suomen kansantalouden vuoden 2019 elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä 57 % (71 Mt CO₂-ekv.) kohdistui niin sanottuihin kulutusperusteisiin päästöihin eli kotimaan kulutukseen ja investointeihin ja loput 43 % (55 Mt CO₂-ekv.) vientiin (Salo ym. 2023)²⁰. Kotimaan loppukäytön päästöt, eli Suomen hiilijalanjälki, oli siis noin 1,4-kertainen alueperäisiin päästöihin (53,1 Mt CO₂-ekv.) verrattuna. Tästä yksityisen kulutuksen osuus (sis. kotitalouksien kulutuksen ja kotitalouksia palvelevien, voittoa tavoittelemattomien yhteisöjen kulutuksen) oli 63 %, julkisen kulutuksen 14 % ja investointien (sis. varaston muutokset) 23 %. Osa julkisesta kulutuksesta on niin sanottuja julkisia yksilöllisiä kulutusmenoja, esimerkiksi julkinen terveydenhuolto ja koulutus. Kun nämä menot lisätään yksityiseen kulutukseen, saadaan kotitalouksien todellisen kulutuksen osuudeksi 71 % kotimaan loppukäytön päästöistä.

Kotitalouksien kulutuksen päästöt (laskettuna kotitalouksien itse hankkimista tavaroista ja palveluista) olivat vuonna 2019 noin 43,7 Mt CO₂-ekv. Keskeisimmät hyödykeryhmät ovat asuminen ja siihen liittyvä energiankulutus (11,6 Mt CO₂-ekv.), yksityisajoneuvojen käyttö (8,4 Mt CO₂-ekv.) ja elintarvikkeet (7,6 Mt CO₂-ekv.). Kotitalouksien yksityisen kulutuksen hiilijalanjäljestä noin 45 % syntyi ulkomailla.

Kansantalouden kulutuksen aiheuttamia ilmastovaikutuksia vähentävät yleisesti kulutuksen vähentäminen, materiaalien kierrätyksen edistäminen ja siirtyminen vähäpäästöisten palveluiden ja jakamistalouden suosimiseen sekä ilmastoystävällisempien tuotteiden käyttöön. Kulutuksen muutos vähäpäästöisemmäksi aiheuttaa todennäköisesti myönteisiä ympäristövaikutuksia. Suosimalla ulkomaisten vaihtoehtojen sijasta kotimaisia tuotteita ja palveluja niiden päästövaikutukset ohjautuvat enemmän Suomen rajojen sisäpuolelle²¹.

²⁰ Luvut poikkeavat hieman raportoiduista (Salo ym. 2023) ENVIMAT-malliin tehtyjen päivitysten takia.

²¹ Päästövaikutuksia ohjautuu kuitenkin myös ulkomaille kotimaisten tavaroiden ja palveluiden tuotantoketjujen kautta.

Kotimaisen palvelu- ja tavaratarjonnan lisääminen ei kuitenkaan välttämättä suoraan johda kysynnän kasvuun, ellei riittävän suuri joukko kuluttajia siirry käyttämään uusia vähäpäästöisempiä vaihtoehtoja. Hiilijalanjälkitiedon lisääminen tuotteisiin ostopäätöksen tueksi ohjaa kuluttajia valitsemaan ilmastoystävällisempiä tuotteita. Eri raaka-aineiden hankinnan vaikutuksista ja tuotteiden hiilijalanjäljistä tulisi kuitenkin saada enemmän ajantasaista, luotettavaa ja avointa tietoa, jota voitaisiin hyödyntää niin kuluttajien, yritysten kuin julkisen sektorinkin valintojen tukena (Nissinen & Savolainen 2019; Nissinen ym. 2022). Digitaaliset tuotepassit edistävät tiedon jakamista tulevaisuudessa.

Kotitalouksien kulutuksen päästöt ovat pienentyneet vuosina 2000–2021 hieman yli 70 miljoonasta CO₂-ekvivalenttitonniin runsaaseen 40 miljoonaan CO₂-ekvivalenttitonniin, eli 41 %. Samanaikaisesti kulutusmenot ovat vuoden 2019 hintatasossa kasvaneet 43 %, noin 85 miljardista eurosta noin 120 miljardiin euroon. Kulutusmenojen kasvulla ja pieneltä osin kulutusrakenteen muutoksilla on ollut päästöjä kasvattava vaikutus, mutta ennen kaikkea teknologisen kehityksen tuoma päästöintensiteetin merkittävä pieneneminen on kääntänyt päästöt laskuun. Suurimmat muutokset ovat tapahtuneet asumisen ja energian, kotitaloussähkön, poltto- ja voiteluaineiden sekä liikennepalveluiden päästöintensiteeteissä.

Elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen osalta keskeisimpiä toimialoja ovat energiahuolto, tavaraliikenne, metalliteollisuus, öljynjalostus ja maatalous (Savolainen ym. 2024). KEITO-hankkeen ENVIMAT-laskennan mukaan kotimaan loppukäytön päästöt ovat vuonna 2035 WEM-skenaarion energian tuotannon ja kulutuksen muutosten seurauksena 44 Mt CO₂-ekv., eli 38 % pienemmät kuin mallin perusvuonna 2019. WAM-skenaariossa CCS:n ja BECCS:n käyttöönotto tuottaisi todennäköisesti vielä hieman suuremmat päästövähennykset. WAM-skenaarioita ei kuitenkaan tarkasteltu tässä yhteydessä, ja on myös epäselvää missä määrin CCS:n tuottamat päästövähennykset ja BECCS:n tuottamat negatiiviset päästöt kohdentuisivat kotimaan loppukäyttöön ja missä määrin vientiin.

Kotitalouksien päästöt ovat WEM-tarkastelussa vuonna 2035 noin 44 % pienemmät vuoteen 2019 verrattuna, eli päästökehitys jatkaisi samalla laskevalla uralla kuin vuosina 2000–2021. Yksityisen kulutuksen hiilijalanjälki on vuonna 2035 arviolta noin 24 Mt CO₂-ekv. ja kotitalouksien kokonaiskulutuksen (sis. kotitalouksia palvelevien yhteisöjen kulutusmenot sekä julkiset yksilölliset kulutusmenot) noin 28 Mt CO₂-ekv. Asumisen ja energian päästöt vähenevät 80 %, yksityisajoneuvojen käytön 60 % ja elintarvikkeiden 21 % vuoteen 2019 verrattuna. Sähkön ja lämmön tuotannon muuttuminen vähäpäästöisempään suuntaan vaikuttaa hyödykkeiden valmistusketjujen päästöihin ja sitä kautta kotitalouksien hiilijalanjälkeen laaja-alaisesti (Salo ym. 2023).

7.3 Hiilinielut ja metsien käyttö

WEM- ja WAM-skenaariossa metsien hakkuut nousevat niin korkealle tasolle (80–82 Mm³ vuonna 2035), että metsät toimivat nettopäästöjen lähteenä vuoteen 2050 saakka. Arviot hakkuutasoista perustuvat KEITO-hankkeessa laadittuihin arvioihin metsäteollisuuden runkopuun kysynnästä ja tuonnista sekä energiapuun kysynnästä (ks. luvut 2.5.2. ja 3). Metsien kääntäminen takaisin nettonieluksi edellyttäisi sitä, että hakkuut jäisivät selvästi arvioitua pienemmäksi. Vertaamalla PEIKKO-hankkeessa (Koljonen ym. 2024) julkaistuja WEM-P- ja WEM-Low-skenaarioita, joissa hakkuutasot ovat 80–82 Mm³ (WEM-P) ja 70–71 Mm³ (WEM-Low) voidaan päätellä, että hakkuiden aleneminen tasolta 80–82 Mm³ tasolle 70–71 Mm³ pienentää metsien vuotuista nettopäästöä tai kasvattaa nettonielua keskimäärin noin 1,8 Mt CO₂-ekv. per vähemmän hakattu Mm³. Näin ollen KEITO-hankkeessa käytettävällä metsien kasvihuonekaasutaseiden laskentamenetelmällä WEM-Low-skenaario tuottaa vuonna 2035 arviolta noin -8 Mt CO₂-ekv. nettonielun. Mikäli hakkuiden alentumisen ja metsien nettonielun kasvun suhde säilyy WEM-Low-skenaariota alemmilla hakkuutasoilla vastaavan suuruisena, saavutettaisiin hiilineutraalius suuruusluokaltaan noin 60 Mm³:n hakkuutasolla, olettamalla, että muiden maankäyttöluokkien ja sektoreiden kasvihuonekaasupäästöt ovat tässä raportissa arvioidun mukaisia. Vastaavaan arvioon vaadittavasta hakkuutasosta päätyivät myös Mosley ym. (2025). On kuitenkin mahdollista, että hakkuiden alentuminen tuottaa yllä esitettyä pienemmän kasvun metsien hiilinieluun, muun muassa luonnon poistuman lisääntymisen seurauksena, jolloin hakkuiden tulisi alentua jopa selvästi alle 60 Mm³:iin, jotta hiilineutraalius saavutettaisiin. Tulevassa pitkän aikavälin skenaarioita tarkastelevassa KEITO-hankkeen raportissa (Koljonen ym. 2025) tarkastellaan laajemmin metsien käyttöä ja maankäyttösektorin kehitystä vaihtoehtoisissa skenaarioissa.

7.4 Sosiaaliset vaikutukset

Sosiaaliset vaikutukset kohdistuvat yksilöön, yhteisöön tai yhteiskuntaan, ja ne aiheuttavat muutoksia ihmisten elinoloissa, viihtyvyydessä, hyvinvoinnissa ja hyvinvoinnin jakautumisessa. Sosiaalisia vaikutuksia voi kohdistua perusoikeuksien ja yhdenvertaisen kohtelun toteutumiseen tai syrjimättömyysperiaatteen noudattamiseen. Sosiaalisia näkökulmia ovat muun muassa työllistäminen, tasa-arvoiset ja turvalliset työolot, oikeudenmukainen palkkaus, palveluiden, tavaroiden ja terveellisten elinympäristöjen saavutettavuus ja esteetön käyttö, ihmisoikeuksien kunnioittaminen, edistäminen ja väärinkäytösten estäminen, eettiset toimitus- ja valmistusketjut ja reilun kaupan periaatteiden noudattaminen. Erityisesti heikommassa asemassa olevia tulee suojella. Tuontituotteiden ja -palveluiden osalta huomioitavaa on, että riski ihmisoikeuksien ja työelämän perusoikeuksien loukkauksiin on joissakin tuoteryhmissä ja valtioissa suurempi. Muun muassa elektroniikka-, vaatetus-,

sairaalaravike- ja kaivosteollisuudessa, maataloudessa, elintarvikkeiden tuotannossa ja rakentamisessa on raportoitu huonoista työoloista. Työperäistä hyväksikäyttöä kuten alipalkkausta, syrjintää ja ihmiskauppaa esiintyy myös Euroopassa, Suomi mukaan lukien (Julkisten hankintojen neuvontayksikkö 2024).

Ilmastotoimet ja niiden toteutus vaikuttavat siihen, millä tavoin toimien aiheuttamat hyödyt ja haitat jakaantuvat yhteiskunnassa. Nykyisen ilmastolain mukaan oikeudenmukaisuusvaikutuksia tulee arvioida ilmastosuunnitelmissa ja niiden raportoinnissa. Energiasiirtymällä ja kiertotaloudella voi olla monia positiivisia sosiaalisia vaikutuksia esimerkiksi työelämään ja osaamiseen, terveyteen ja turvallisuuteen sekä yleiseen elämänlaatuun ja hyvinvointiin. Vaikutusten jakautumisen oikeudenmukaisuuden arvioinnissa on olennaista tunnistaa ihmisryhmien erityistarpeet ja erilaiset toimintamahdollisuudet, jotka vaikuttavat hyötyjen ja haittojen toteutumiseen. Esimerkiksi asumismuoto määrittää sitä, millaiset mahdollisuudet kotitalouksilla on osallistua päästöttömän energian tuotantoon ja hyötyä siitä. Olennaista on myös ilmastotoimia koskevien menettelytapojen oikeudenmukaisuus, kuten eri ryhmien mahdollisuudet osallistua politiikan valmisteluun. Kokemus ilmastopolitiikan oikeudenmukaisuudesta vaihtelee ja siihen vaikuttavat muun muassa kokijan asuinpaikka, ikä, sukupuoli ja koulutustausta.

Kansalaiskyselyjen perusteella (ks. Koljonen ym. 2025; 2019, Kulha ym. 2021, Vainio ym. 2023) esimerkiksi liikenteen, asumisen (ml. energia) ja ruoan päästövähennyksiä tavoittelevat kulutuksen niin sanotut pehmeät ohjauskeinot kuten viestintä, pakkausmerkinnät ja kevyt hintaohjaus koetaan yleensä hyväksyttävämmäksi kuin rajoitukset, kiellot tai verotuksen muutokset. Eri ihmisryhmillä ja alueilla voi olla hyvin erilaiset resurssit sääntelyyn sopeutumisessa, ja huoli toimien oikeudenmukaisesta maantieteellisestä ja ihmisryhmiin kohdentumisesta vaikuttaa niiden hyväksyttävyyteen. Ilmastopolitiikan vastustamisen taustalla on usein huoli työpaikan, toimeentulon, sosioekonomisen aseman tai henkilölle merkityksellisen elämäntavan menettämisestä, tai tunteesta yksilön vapauden ja maailmankuvan rajoittamisesta uusien toimintatapojen vuoksi (Hakala ym. 2021). Eriarvoisuuden kokeminen, esimerkiksi tunne jäämisestä päätöksenteon tai myönteisen kehityksen ulkopuolelle, voi johtaa arvojen kovenemiseen (Fornaro 2021, Hakala ym. 2021). Uudet toimet edellyttävät usein myös joustavuutta omaksua ja opetella uusia toimintatapoja ja erilaisten teknologioiden tai digitaalisten työkalujen hyödyntämistä, mikä voi asettaa esimerkiksi eri ikäluokkia eriarvoiseen asemaan.

Esimerkiksi energiasiirtymällä on vaikutuksia kansalaisten talouksiin, mutta vaikutukset eivät ole suoraviivaisia ja riippuvat muun muassa kotitalouksien tulotasosta, asumismuodosta, lämmitysmuodosta ja elinolosuhteista. Energiasiirtymä hyödyttää niitä kotitalouksia, jotka pystyvät reagoimaan sähkömarkkinoiden hintaheilahteluihin joustavasti tai investoimaan muun muassa aurinkopaneeleihin tai lämpöpumppuihin, jotka alentavat ostoenergian määrää ja siten kotitalouksien energiakustannuksia. Toisaalta taas kotitaloudet, jotka eivät tulojen tai asumismuodon vuoksi pysty alentamaan energiakustannuksia ja ovat riippuvaisia sähkölämmityksestä, kohtaavat talven tuulettomat ja kylmät ajanjaksot

selvästi kohonneina kustannuksina. Asumisen lisääntyvä jäähdytystarve ja siihen vastaaminen on myös kasvava haaste ilmaston lämmetessä ja väestön ikääntyessä.

Sähköautot ovat yleistyneet kaupunkiseuduilla enemmän kuin maaseudulla, jossa latauksen järjestäminen olisi teknisesti helpompaa jopa kuluttajien itse tuottamalla uusiutuvalla sähköllä. Julkinen ohjaus Suomessa on lähinnä suosinut ihmisiä, joilla on varaa uusiin autoihin, kun taas muissa maissa on esimerkkejä myös käytettyjen sähköautohankintojen tuesta tai tuetuista edullisemmista leasing-sopimuksista (Heiskanen ym. 2024). Näiden ohella toki muun muassa romutuspalkkio ja latausinfrastruktuurin tuki taloyhtiölle on tukenut kaikkien tuloluokkien ihmisiä.

Kotitalouden eroavaisuudet tarkoittavat sitä, että energiaparannuksia pitää edistää muun muassa vuokra-asuntokannassa sekä kohdistaa tukia energiaköyhyiden pienentämiseen. Suomessa energiaköyhyys ei ole ollut tyypillisesti suurta, mitä on edistänyt kattava sosiaaliturvajärjestelmä, rakennuskannan melko suuri energiatehokkuus sekä energiantuki- ja neuvontapalvelut (Korvenmaa ym. 2024). Energiaköyhyiden hillitsemistä ehkäisisi mahdollisimman hyvä olemassa olevien toimien ylläpito, mikä kuitenkin on uhattuna säästötoimenpiteiden takia.

Reilun siirtymän mahdollistamiseksi siirtymän vaikutukset eri ryhmiin tulee tunnistaa sekä ottaa kaikki tahot päätöksentekoon mukaan ja tasata hyötyjä haittojen hyvittämiseksi. Ilmastotoimien läpinäkyvyyden, luotettavan ja avoimen tiedon jakamisen sekä kansalaiskeskustelujen edistäminen ovat tärkeitä edellytyksiä sosiaalisen oikeudenmukaisuuden toteutumisessa (Lyytimäki 2020). Toimien hyväksyttävyyden lisäämiseksi toimien talousvaikutuksista ja päästövähennysten taloudellisista ohjauskeinoista tulisi viestiä ajoissa, riittävän laajasti ja selkeästi, jotta kuluttajat ja yritykset voivat sopeuttaa toimintaansa ja hakea tarvittavia tukia tai vähennyksiä (Kulha ym. 2021). Korhosen toimittaman kirjan (2025) mukaan aktiivisia toimenpiteitä tarvitaan, jotta talouden ja yhteiskunnan rakennemuutos ei jaa suomalaisia niin sanotusti voittajiin ja häviäjiin.

Euroopan unionin ilmastoneutraaliuustavoitteen tueksi perustetun oikeudenmukaisen siirtymän mekanismin (Just Transition Mechanism) ja vuosia 2021–2027 koskevan rahaston (Just Transition Fund) (EC, COM/2020/22 final) tavoitteena on lieventää ilmastosiirtymän sosioekonomisia ja ympäristöllisiä haittavaikutuksia. Tukea kohdistetaan niille alueille ja työntekijöille, joihin siirtymä vaikuttaa eniten. Ohjelmakaudella 2021–2027 Suomi voi saada EU-rahoitusta noin 446 miljoonaa euroa, minkä lisäksi kansallinen julkinen rahoitusosuus hankkeissa on 30 prosenttia. Suomessa rahoitus kohdistuu oikeudenmukaisen siirtymän toimiin turpeen energiakäytön puolittamisen ympäristöllisten haittavaikutusten korjaamiseksi sekä työllisyyden ja kestävien aluetalouksien turvaamiseksi. Toimilla tavoitellaan toimialan työvoiman sopeuttamista ja elinkeinojen monipuolistamista uudelleenkoulutuksen ja -työllistämisen toimenpitein. Turvesektorin yrittäjien ja muun työvoiman osaamista ja valmiuksia kehitetään uuden liiketoiminnan mahdollistamiseksi esimerkiksi puunkorjuun, turvesoiden ennallistamisen ja vihreän teknologian aloille. Turvetuotannosta poistuvien alueiden kunnostamisen,

ennallistamisen ja käyttötarkoituksen muutoksen kautta voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä ja vesistökuormitusta sekä lisätä luonnon monimuotoisuutta. (TEM 2022)

7.5 Energiaturvallisuus ja huoltovarmuus

Energiasiirtymän edistyminen vaikuttaa keskeisesti energiaturvallisuuteen ja siihen, miten huoltovarmuutta voidaan toteuttaa. Tuontipolttoaineista luopuminen tai niiden käytön merkittävä vähentäminen vahvistaa energiaturvallisuutta (Kivimaa & Sivonen 2023, Scholten ym. 2020), sillä Suomen energiajärjestelmä ei ole tällöin enää riippuvainen hinnanvaihteluista tai häiriöistä kansainvälisissä öljyn, maakaasun ja kivihiilen kauppaketjuissa. Tämä tarkoittaa kuitenkin sitä, että keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä energiaturvallisuus ja huoltovarmuus pitää uudelleenorganisoida siten, että polttoaineiden varmuusvarastoinnille kehitetään vaihtoehtoisia, päästöttömiä ratkaisuja. Lyhyellä tähtäimellä Suomessa käytetään vielä maakaasun, turpeen ja puupolttoaineiden varmuusvarastointia. Energia- ja ilmastopolitiikkaa tulisi myös tehdä tiiviimmin yhteistyössä etenkin turvallisuus- ja puolustuspolitiikan kanssa energiaturvallisuuden parantamiseksi, sillä näiden sektoreiden yhteenliittymät ovat merkittävät, esimerkiksi tuulivoimaloiden suunnittelun, kaksoiskäyttötekniikan ja kyberturvallisuuden osalta (Kivimaa 2024, Kivimaa & Sivonen 2021, Kivimaa ym. 2024).

Tuuli- ja aurinkovoiman vaihtelevan tuotannon takia sekä suurikokoisen ydinvoiman tuntikohtaisen tuotantosäätelyn ollessa hankalaa, tarvitaan nopeaa teknistä kehitystä sekä lisääntyvää käyttöönottoa energiavarastoinnin, kysyntä- ja kulutusjouston, pumpattavan vesivoiman sekä pienydinvoiman ratkaisuihin (EASAC 2025). Näiden lisäksi tulee kehittää kaukolämmön ratkaisuja sähkön varastoinnin edesauttamiseksi (Sihvonen ym. 2024). Tekninen kehitys on monessa ratkaisussa jo pitkällä, eli kyse on myös energiapolitiikan ja -markkinoiden tarjoamista kannustimista. Spot-markkinoiden aiheuttamat hintavaihtelut omalta osaltaan kannustavat muun muassa sähkön varastoinnin kehittymiseen. Tästä ovat esimerkkinä viimeaikaiset investoinnit sähkökattiloihin, jotka ovat yleistyneet nopeasti energiateollisuudessa. Myös energiansäästö- ja tehostamistoimenpiteillä tulisi kannustaa järkevään energiankäyttöön, ja säästötoimilla tulisi auttaa säätelemään energiankäyttöhuippuja sähköverkon kuormituksen vähentämiseksi.

Energiasäästön, energiatehokkuuden ja materiaalitehokkuuden edistäminen osana energiasiirtymää, muun muassa energiatehokkuusmääräysten ja kiertotalouden kautta, edistää huoltovarmuutta (EASAC 2025). Kun itse energiaa tai vaikkapa kriittisiä mineraaleja ja teknologiakomponentteja tarvitaan säästö- ja tehokkuustoimenpiteiden kautta vähemmän, paranee energiajärjestelmän huoltovarmuus tätä kautta.

Yhteiskunnan nopea sähköistyminen kuormittaa energiajärjestelmää enenevässä määrin nyt ja tulevaisuudessa. Tämän takia sähköjärjestelmän vakaus ja häiriötön toiminta, mukaan lukien maiden väliset sähköyhteydet, ovat

elintärkeitä. Viimeaikaiset tapahtumat näyttävät, että sähköjärjestelmään kohdistuu onnettomuuksia sekä tarkoituksellista sabotaasia. Täten energiaturvallisuuden vahvistaminen edellyttää myös energiainfrastruktuurin parempaa suojelua sekä kyberturvallisuuden parantamista. Näistä riskeistä huolimatta nähdään, että EU-maiden välinen yhteistyö sähkömarkkinoilla parantaa energiaturvallisuutta sekä vähentää kustannuksia (EASAC 2025).

Uusiutuvan energian, kulutusjouston sekä energiatehokkuuden ratkaisut voivat parantaa myös kansalaisten energiaturvallisuutta kotitaloustasolla. Ymmärrys siitä, miten energiamarkkinat toimivat, kotitalouksien oma energiatuotanto sekä kulutusjousto alentavat kotitalouksien energiahintoja ja edesauttavat heidän toimijuuttaan korkeiden energiahintojen aikana (EASAC 2025). Kotitalouksien energiaratkaisujen saatavuus on kuitenkin rajoitettumpaa esimerkiksi vuokralla asuville, kerrostaloasukkaille tai pienituloisille (Korvenmaa ym. 2024). Täten kansalaisten energiaturvallisuus edellyttää toimenpiteitä, joilla voidaan edistää myös energiaoikeudenmukaisuutta. Oikeudenmukaisella siirtymällä voidaan parantaa sisäistä turvallisuutta ja kansakunnan resilienssiä (Sivonen & Kivimaa 2025). Tällä tarkoitetaan muun muassa sitä, että energiasiirtymää edistettäessä tulee ottaa huomioon esimerkiksi maankäyttöön liittyvät kiistat ja erimielisyydet, ja taata haittojen ja hyötyjen tasapäinen jakautuminen (Jenkins, Sovacool & McCauley 2018).

7.6 Ilmanlaatu ja terveys

Suomessa ulkoilmasta mitatut ilmansaasteiden pitoisuudet ovat globaalisti katsottuna erittäin alhaisia. Sekä kotimaiset että ulkomaiset päästöt vaikuttavat silti ilmanlaatuamme, ja ilmansaasteille altistumisesta aiheutuu meilläkin huomattavaa kansanterveydellistä haittaa. Tuoreimman, mallinnukseen ja tilastollisiin menetelmiin pohjautuvan arvion mukaan ilmansaasteet aiheuttivat Suomessa 2000 ennenaikaista kuolemaa vuonna 2015 (Lehtomäki ym. 2018). Ihmisten terveydelle haitallisimpia ilmansaasteita ovat pienhiukkaset eli halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin hiukkaset (= PM_{2.5}), joiden arvioitiin aiheuttavan 74 prosenttia ilmanlaatuun liittyvistä terveyshaitoista. Altistuminen hengitysilman pienhiukkasille voi johtaa eriasteisiin terveyshaittoihin, jotka vaihtelevat lievistä ärsytys- ja hengityselinoireista, lääkityksen tarpeesta aina lisääntyneisiin sairaalahoitojaksoihin ja kuolleisuuteen. Pitkäaikainen altistuminen on erityisen haitallista, koska se voi lisätä matala-asteista tulehdusta ja siten pahentaa kroonisia sairauksia tai johtaa niiden kehittymiseen. Ilmansaasteiden terveyshaittoja arvioidaan usein väestötason tutkimuksilla, jolloin yksittäisessä tapauksessa ilmansaasteiden osuutta vakavan sairauden kehittämisessä tai eliniän lyhenemisessä on vaikea todentaa.

7.6.1 Ilmansaasteiden kansanterveydelliset vaikutukset Suomessa

Vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian yhteydessä laaditun ympäristövaikutusten arvioinnin (Soimakallio ym. 2017) osana mallinnettiin hengitysilman pienhiukkasille altistumisesta syntyviä terveyshaittoja Suomessa vuosina 2015 ja 2030 (taulukko 15). KEITO-hankkeen skenaarioiden terveysvaikutuksia arvioitiin vuoden 2016 strategian terveystallinnustulosten ja KEITO-hankkeen skenaarioiden sektorikohtaisten pienhiukkaspäästöjen ja 2016 strategian päästöjen suhteellisten erojen perusteella (taulukko 16). Muiden tärkeimpien ilmansaasteiden päästöt eri vuosina löytyvät Liitteestä F.

Pääasiallisia hiukkasten lähteitä ovat erilaiset polttoprosessit, joista vapautuu kiinteitä partikkeleita eli primäärihiukkasia sekä kaasumaisia päästöjä, jotka voivat myöhemmin tiivistyä ilmakehässä ns. sekundäärihiukkasiksi. Kaukokulkeuma Euroopasta ja Venäjältä on suurin ilmansaasteille altistumisen lähde Suomessa. Kotimaisten päästölähteiden arvioitiin aiheuttavan noin 40 prosenttia pienhiukkasille altistumisen terveyshaitoista, joskin tästä tarkastelusta puuttuivat kotimaisten lähteiden sekundäärihiukkaset, joita arvioitiin erikseen vuoden 2022 ilmasto- ja energiastrategian yhteydessä (katso tämän luvun loppuosa).

Yksittäisistä sektoreista puun pienpoltolla oli selvästi suurin vaikutus terveyteen. Tulisijassa palamistapahtuma on aina jossain määrin epätäydellinen, jolloin palamatta jääneestä aineksesta muodostuu hiukkasia. Tällöin pienhiukkasten päästöt ovat suuria suhteessa tuotettuun lämpöenergiaan. Päästöt laskevat tulevaisuudessa johtuen pääasiassa tulisijakannan uusiutumisesta vähäpäästöisemmäksi. KEITO-hankkeen arviot puun pienpolton päästöistä tulevaisuudessa ovat huomattavasti alemmat kuin vuoden 2016 strategian yhteydessä arvioitujen. Tämä johtuu pääasiassa tuoreista päästömittaustuloksista, jotka ovat laskeneet uusien puukiukaiden päästökerronarvioita (Tissari ym. 2019) sekä tiukkenevien energiatehokkuusmääräysten myötä oletetusti vähenevästä lämmöntarpeesta ja sitä kautta puun käytöstä uusissa pientaloissa. Puun pienpoltosta aiheutuvat negatiiviset terveysvaikutukset vuonna 2030 voidaan täten arvioida olevan noin 39 prosenttia alemmat kuin mitä taulukossa 15 on esitetty, ja vuoteen 2050 päästöt ja terveysvaikutukset laskevat edelleen. Puun käytön ja päästöjen tulevaisuusarvioihin liittyy kuitenkin merkittäviä epävarmuuksia. Puulämmityksen suosion ja ilmanlaatulainsäädännön vaikutusta päästöihin ja terveyshaittoihin on tarkasteltu seuraavassa luvussa.

Vuonna 2015 tieliikenteen ja työkoneiden pakokaasut aiheuttivat vielä merkittäviä terveyshaittoja, mutta vuoteen 2030 mennessä kehittyneemmän moottoritekniikan käyttöönoton ja sähköautojen yleistymisen arvioidaan laskevan päästöt hyvin alhaiselle tasolle ilman lisätoimiakin. Esimerkiksi, vaikka työkoneiden ja muun liikenteen päästöt vuonna 2030 arvioitiin KEITO-hankkeessa 20 prosenttia korkeammaksi kuin vuoden 2016 strategiassa, päästömäärät ja vastaavasti terveysvaikutukset ovat suhteellisen matalalla tasolla. Vuoden 2050 tieliikenteen ajoneuvokannan arvioidaan olevan jo lähes päästötöntä pakokaasujen ilmansaasteiden osalta. Tällöin katupöly jäisi liikenteen osalta suurimmaksi päästölähteeksi. Katupölypäästöjen määrään vaikuttavat pääasiassa

ajosuuritteen kehittyminen, rengasvalinnat ja käytössä olevat katujenhoitomenetelmät. Sähköautojen yleistymisellä on vaikutuksia katupölypäästöihin, ja osa vaikutuksista on päästöjä lisääviä ja osa vähentäviä, eikä vaikutusten määrästä tai suunnasta ole tällä hetkellä varmuutta (Gustafsson ym. 2024). Taulukon Taulukko 15 arviot katupölypäästöjen terveysvaikutuksista voidaan pitää olevan oikeassa suuruusluokassa myös KEITO-hankkeen skenaarioille vuonna 2030 (päästöt ovat 8 % korkeammat kuin vuoden 2016 strategian arvioissa). Vuoteen 2050 katupölypäästöjen arvioidaan kasvavan lisääntyvien liikennemäärien myötä. Näissä laskelmissa ei kuitenkaan ole otettu huomioon kitkarenkaiden suosion kasvua tai kehittyviä katupölyn torjuntakeinoja. Katupölypäästöjen tulevaisuuden kehitykseen vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan tarkemmin seuraavassa luvussa.

Energiantuotanto- ja teollisuuslaitosten päästöt pääsevät ilmakehään korkeista piipuista, jolloin niiden leviäminen ja laimeneminen on tehokasta ja vaikutukset väestön altistumiseen ja terveysvaikutuksiin lähialueilla ovat suhteellisen pieniä verrattuna läheltä hengityskorkeutta tapahtuviin päästöihin. KEITO-hankkeessa energiantuotannon ja teollisuuden pienhiukkasten päästöt vuonna 2030 ovat lisäksi 43 prosenttia alemmat kuin vuoden 2016 strategiassa, johtuen huomattavasti vähäisemmästä määrästä polttoperäistä energiantuotantoa. Täten energiantuotannon ja teollisuuden suorien hiukkaspäästöjen aiheuttamien terveysvaikutusten voidaan arvioida olevan vastaavasti 43 prosenttia alemmat vuonna 2030 kuin mitä taulukossa 15 on esitetty.

Suorien pienhiukkaspäästöjen lisäksi polttolaitokset ovat suurin SO₂- ja NO_x-päästöjen lähde Suomessa, aiheuttaen sekundääristen hiukkasten muodostumista alueellisesti. Vuoden 2022 ilmasto- ja energiastrategian yhteydessä mallinnettiin karkeasti myös näiden kotimaisten sekundäärihiukkasia aiheuttavien päästöjen vaikutus ulkoilman pienhiukkaspitoisuuksiin ja siten terveyshaittojen syntymiseen. Käyttäen KEITO-hankkeessa mallinnettuja SO₂- ja NO_x-päästömääriä teollisuus- ja polttolaitoksille (Liite F), niiden arvioidaan aiheuttavan noin 20 ennenaikaista kuolemaa Suomessa vuonna 2030, taulukon 15 perusteella arvioitujen lisäksi.

Taulukko 15. Vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian skenaarioista mallintamalla arvioidut, PM_{2,5}-pienhiukkasten aiheuttamat ennenaikaiset kuolemat ja sairaalahoitojaksot Suomessa, jaettuna päästölähteittäin (Soimakallio ym. 2017). Ennenaikaiset kuolemat johtuvat pääosin pitkäaikaisesta altistumisesta ja sairaalahoitojaksot lyhytaikaisesta altistumisesta. Laskelmissa ei ole mukana kotimaista päästöistä muodostuneita sekundäärisiä pienhiukkasia.

2015		WAM 2030 (E&I 2016)			
		Ennenaikaiset kuolemat		Sairaalahoitojaksot	
Päästölähde		Nykyinen väestö	Ennustettu väestö	Sydän- ja verisuonisairaudet	Hengityselin-sairaudet
Energiantuotanto ja teollisuus	9	7	8	3	4
Pienpoltto	210	190	210	90	100
Tieliikenne	77	10	11	5	5
Työkoneet ja muu liikenne	74	10	12	5	6
Katupöly	55	53	61	27	30
Muut lähteet*	53	55	64	29	31
Kotimaiset yhteensä	470	320	360	160	180
Alueellinen ja kaukokulkeuma	960	830	930	410	450
Kaikki yhteensä	1400	1200	1300	570	620

Lukujen pyöristyksestä johtuen osa taulukon tiedoista ei ole täysin yhteneviä lähteen kanssa.

*Sisältää mm. rakennustyömailta, maataloudesta ja turpeentuotannosta syntyvät pölypäästöt.

Kategoria ”muut lähteet” sisältää suuren joukon mekaanisesti syntyvän pölyn päästölähteitä. Näihin kuuluu tyypillisesti kaupunkialueilla tapahtuvia päästöjä, muun muassa rakennustyömailta ja materiaalien käsittelystä, sekä haja-asutusalueiden päästöjä muun muassa maataloudesta ja turpeentuotannosta. KEITO-skenaarioissa muiden lähteiden päästöt ovat yli 70 % alemmat vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategiassa (Soimakallio ym. 2017) arvioituihin nähden, johtuen pääasiassa turpeen tuotannon alhaisemmasta tasosta sekä päästölähteiden erilaisista määrittelyistä. Vastaavasti terveysvaikutusten voidaan arvioida olevan huomattavasti taulukossa 15 esitettyjä alemmat. Lisäksi mekaanisesti syntyneiden pölyjen terveysvaikutusarviot ovat hyvin epävarmoja.

Taulukko 16. Suomen PM_{2,5}-pienhiukkasten päästöt (1000 tonnia/vuosi) pääsektoreilta nykytilassa sekä vuosina 2030 ja 2050 KEITO-hankkeen WEM-skenaariossa sekä vertailu vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian (Soimakallio ym. 2017) arvioituihin vuoden 2030 päästöihin.

Päästölähde	2022	2030	2050	WAM 2030 (2016 E&I)	Suhteellinen ero WEM 2030 (KEITO) vs WAM 2030 (2016 E&I)	Suhteellinen ero WEM 2050 (KEITO) vs WAM 2030 (2016 E&I)
Energiantuotanto ja teollisuus	2,2	1,9	1,7	3,4	-43 %	-50 %
Pienpoltto	8,2	5,9	2,8	9,7	-39 %	-71 %
Tieliikenne	0,40	0,16	0,01	0,15	7 %	-93 %
Työkoneet ja muu liikenne	0,92	0,55	0,34	0,46	20 %	-26 %
Katupöly	1,1	1,1	1,4	1,1	8 %	31 %
Muut lähteet*	0,89	0,87	0,84	3,0	-71 %	-72 %
Yhteensä	13,7	10,6	7,1	17,8		

*Sisältää mm. rakennustyömailta, maataloudesta ja turpeentuotannosta syntyvät pölypäästöt. KEITO-skenaarioiden huomattavasti alemmat päästöt verrattuna vuoden 2016 strategiaan johtuvat pääasiassa turpeen tuotannon alhaisemmasta tasosta ja päästölähteiden erilaisista määrittelyistä.

7.6.2 Puulämmityksen ja katupölyn päästöihin ja ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä tulevaisuudessa

Tässä luvussa pohditaan kahden tärkeimmän pienhiukkasten terveysvaikutuksia aiheuttavan sektorin, puun pienpoltton ja katupölyn, tulevaisuuden päästöihin ja ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä, jotka eivät käy suoraan ilmi edellä esitetystä päästöarvioista. Puun pienpoltton osalta päästöjen ennustetaan laskevan tulevaisuudessa. Päästölaskemien mukaan pienhiukkasten päästöt olisivat nykytasoon verrattuna 31 prosenttia alemmat vuonna 2030 ja 67 prosenttia alemmat vuonna 2050. Päästöjen lasku johtuu pääasiassa tulisijakannan luontaisesta uusiutumisesta vähäpäästöisemmäksi sekä pienemmästä lämmitystarpeesta uusissa pientaloissa. Puun pienpoltton suosio on kasvanut Suomessa menneinä vuosikymmeninä, joka on myös lisännyt päästöjä (Savolahti 2020). Viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana käyttömäärät ovat näyttäneet tasaantuvan ja päästöt kääntyneet hienoiseen laskuun, joskin vaihtelevat sääolosuhteet voivat näkyä suurinakin vuosittaisina eroina puunkäyttötilastoissa. Uusien pientalojen energiatehokkuusmääräykset laskevat lämmitystarvetta ja sitä kautta myös puun käyttömääriä lämmitykseen. Kuitenkin puulämmityksen

suosioon tulevaisuudessa liittyy suuria epävarmuuksia, joihin voivat vaikuttaa muun muassa muiden lämmitystapojen, erityisesti sähkön, hinta (Luke 2023). Suurimmat terveysvaikutukset tulevat säännöllisestä puunkäytöstä tiiviisti asutuilla pientaloalueilla, eli lisälämmitykseen käytettävistä takoilta ja saunojen kiukaista taajamissa.

Tällä hetkellä puun pienpolttolaitteiden päästöjä sääntelee EU:n ekosuvunitteludirektiivin asetus kiinteän polttoaineen lämmityslaitteille, mikä määrittää vaatimuksia uusien polttolaitteiden, esimerkiksi varaavien takkojen päästötasoille. Täten puun pienpolton päästöt laskevat ajan myötä tulisijakannan uusiutuessa. Nämä muutokset on otettu huomioon KEITO-hankkeen laskelmissa. Ekosuvunitteludirektiivin vaatimukset päästöjen suhteen eivät kuitenkaan ole erityisen vaativat esim. varaaville tulisijoille. On mahdollista, että direktiivin vaatimukset tiukentuvat tulevaisuudessa, jolloin päästöt voisivat vähentyä laskelmissa arvioitua nopeammin. Myöskään puukiukaat eivät tällä hetkellä kuulu ekosuvunitteludirektiivin asetuksen piiriin. On mahdollista, että myös kiukaat tulisivat tulevaisuudessa asetuksen tai muun päästölainsäädännön piiriin. Kiukaiden päästömittauksissa on havaittu tälläkin hetkellä kaupallisesti myytävien kiukaiden olevan jonkin verran vähänpäästöisempiä verrattuna vanhempiin kiuasmalleihin (Tissari ym. 2019). Kiukaiden sisällyttäminen päästölainsäädännön piiriin saattaisi tehostaa vähänpäästöisempiin kiuasmalleihin siirtymistä ja alentaa päästöjä laskelmissa arvioitua enemmän.

Puun pienpolton päästöihin vaikuttaa polttolaitteiden ja puun käyttömäärien lisäksi myös tulisijojen käyttäjien taidot. Taitamaton käyttö tai huonolaatuisen puun tai roskien poltto voi lisätä päästöt moninkertaisiksi. Käyttötapojen vaikutus päästöihin pyritään ottamaan huomioon päästölaskelmissa (Savolahti ym. 2016), ja niitä on kartoitettu kyselyillä (Ohtonen ym. 2024). Kyselyjen mukaan suomalaiset osaavat pääosin käyttää tulisijojaan oikein, mutta myös parantamisen varaa on. Hyviin tulisijojen käyttötapoihin liittyvällä valistuksella ja tiedottamisella voitaisiin luultavasti jossain määrin vaikuttaa päästöihin tulevaisuudessa.

Katupölyn päästöjä ja niiden vähentämisen keinoja on Suomessa tutkittu pitkäjänteisesti mittauksin ja mallinnuksin (Ritola ym. 2021). Suomessa ja muilla pohjoisilla alueilla teiden ja katujen liukkauden torjunta talvisin tuo omat haasteensa katupölyn torjuntaan. Nastarenkaiden käyttö lisää tienpintojen kulumaa ja hiukkaspäästöjä ja teiden hiekoitus ja suolaus lisäävät pölyämistä. Erilaisten liukkauden torjunnan keinojen sekä katujen puhdistuksen ja pölynsidonnan keinojen tehokkuuksia on tutkittu. Kitkarenkaiden osuuden lisääminen on arvioitu olevan tehokkain keino liikenteen aiheuttamien pölypäästöjen vähentämisessä (Hänninen ym. 2019). KEITO-hankkeen skenaarioiden päästölaskelmissa kitka- ja nastarenkaiden osuuksien oletettiin säilyvän nykyisellä tasolla. Kuitenkin kitkarenkaidet ovat jatkuvasti yleistyneet (TM 2025), ja tämän trendin voidaan olettaa jatkuvan myös tulevaisuudessa. Tästä syystä taulukon 16 katupölypäästöt vuosille 2030 ja 2050 ovat todennäköisesti jonkin verran yliarvioita.

Sähköautojen yleistymisellä on vaikutuksia katupölypäästöihin, mutta niitä ei ole otettu huomioon taulukon 16 päästöarvioissa. Päästömittausten perusteella

raskaammat sähköautot lisäävät tienpinnan kulumapäästöjä, erityisesti nastarenkailla ajettaessa (Gustafsson ym. 2024). Toisaalta tutkimukset Ruotsissa ja Norjassa ovat osoittaneet, että nastarenkaita käytetään sähköautoissa huomattavasti harvemmin kuin polttomoottoriautoissa. Lisäksi regeneratiivisen jarrutuksen ansiosta sähköautot tuottavat vähemmän jarrujen kulumisesta aiheutuvia päästöjä. Näiden eri suuntiin vaikuttavien tekijöiden takia tällä hetkellä ei pystytä varmasti arvioimaan, lisääkö vai vähentääkö sähköautojen yleistyminen katupölypäästöjä.

Katupölypäästöihin voidaan vaikuttaa myös katujen ja teiden pölyntorjuntatoimilla, muun muassa katujen puhdistuksella ja pölyn sidonnalla. Näillä on arvioitu olevan varsin rajallinen vaikutus kansallisen tason kokonaispäästömääriin, mutta paikallisesti ne voivat vähentää päästöjä ja parantaa ilmanlaatua kaupungeissa (Hänninen ym. 2019). Ilmanlaatulainsäädäntö ei suoraan aseta vaatimuksia päästölähteille, mutta saattaa raja- tai tavoitearvojen ylityessä vaatia paikallisia toimenpiteitä ilmanlaadun parantamiseksi ja sitä kautta vaikuttaa myös päästöihin. EU:n ilmanlaatudirektiivin uudistus vuonna 2024 tiukensi vaatimuksia monien eri ilmansaastekomponenttien pitoisuuksien suhteen. Nämä vaatimukset, erityisesti hengitettävien PM₁₀-hiukkasten vuorokausiraja-arvon ja sallittujen ylitysmäärien sekä syöpävaarallisen bentso(a)pyreenin vuosiraja-arvon suhteen, saattavat vaatia paikallisia toimenpiteitä, jotka kohdistuvat katupölyn ja puun pienpolton päästöihin, vastaavasti.

7.7 Luonnonvarojen käyttö

7.7.1 Kansantalouden materiaalivirrat

Suomen taloudessa sekä tuotanto että kulutus ovat materiaali-intensiivisiä. Kansainvälisissä materiaalikulutuksen indikaattorien²² vertailuissa Suomen materiaali-intensiteetti väkilukuun suhteutettuna on yksi suurimmista (Eurostat 2025a). ENVIMAT-tulosten mukaan raaka-aineiden kulutus (Raw Material Consumption, RMC) eli niin sanottu materiaalijalanjälki Suomessa asukasta kohti on ollut 39–52 tonnia vuosien 2010 ja 2021 välillä, EU:n keskiarvon ollessa 14–15 tonnia asukasta kohden (Savolainen ym. 2024). Kestävän luonnonvarojen kulutuksen tulisi olla korkeintaan 8–14 tonnia ja raaka-ainekulutuksen 3–6 tonnia henkilöä kohden vuodessa (Bringezu 2015). Suomessa materiaalien kulutus on

²² Esimerkiksi suora materiaalipanous DMI (direct material input) kattaa kotimaisten luonnonvarojen oton ja tuonnin suorat materiaalmäärät, kotimainen materiaalien kulutus DMC (domestic material consumption, joskus myös direct material consumption) puolestaan kuvaa kotimaisten luonnonvarojen ottoa. Kotimainen raaka-aineiden kulutus RMC (raw material consumption) ilmaisee (kotimaisten ja ulkomaisten) luonnon raaka-aineiden määrää, jonka kotimainen loppukäyttö (=kulutus ja pääomanmuodostus eli investoinnit) on vaatinut. Luonnonvarojen kokonaiskulutus TMC (total material consumption) sisältää käytetyn ja käyttämättömän oton). Raaka-aine-ekvivalentti RME (raw material equivalent) materiaalivirta saadaan, kun tuonti- ja vientituotteiden suoriin massoihin lisätään tuotteiden koko valmistusketjussa tarvittu raaka-ainepanokset.

merkittävää varsinkin julkisia hankintoja toteuttavassa maarakentamisessa (erityisesti soran ja murskeen käyttö). Kotitalouksien kulutusta tyydyttämään käytetään puolestaan runsaasti luonnonvaroja ja energiaa etenkin rakentamisen, energian- ja ruoantuotannon valmistusketjuissa (Nissinen & Savolainen 2019, Savolainen ym. 2024).

Suomessa keskimäärin 60 prosenttia raaka-ainekulutuksesta on ollut maa- ja kiviaineksia, reilut 10 prosenttia (12–15 %) biomassaa ja noin 5 prosenttia ei-metallisia mineraaleja (Savolainen ym. (2024). Fossiilisten polttoaineiden osuus on laskenut ja metallimalmien kulutus kasvanut. Tämä voi heijastaa energiasektorin siirtymää kohti uusiutuvia energialähteitä ja toisaalta energijärjestelmien rakentamisen vaatimaa kasvavaa raaka-ainetarvetta. Raaka-aineiden kauppataaseen perusteella Suomi on ollut vuosina 2010–2021 fossiilisten polttoaineiden nettotuoju ja biomassan sekä metallimalmien osalta nettoviejä (Savolainen ym. 2024).

Kotimaan loppukäytössä merkittävimmät tuoteryhmät olivat rakennukset ja rakennelmat (55 % RMC:stä), palvelut (28 %) ja elintarvikkeet ja maataloustuotteet (7 %). Raaka-aine-ekvivalentissa (RME) viennin suurimmat tuoteryhmät olivat perusmetallit (26 %), puu- ja paperituotteet (20 %), metallirikasteet (13 %), metalli- ja konepajatuotteet (8 %), palvelut (8 %), fossiiliset polttoaineet (7 %) ja kemialliset tuotteet (7 %). Suomen taloudelle ominaista on, että tuontiraaka-aineita jalostetaan vientituotteiksi kuten öljyjalosteet, perusmetallit, konepajatuotteet ja kemialliset tuotteet. Vientiä palvelevia kotimaisia luonnonvaroja ovat erityisesti metallimalmit, joista jalostetaan rikasteita, sekä raakapuu, josta valmistetaan puu- ja paperituotteita (Savolainen ym. 2024). Talouden rakenne on pysynyt pitkään samanlaisena (Koskela ym. 2013, Nissinen & Savolainen 2019, Savolainen ym. 2024).

Yksityisen kulutuksen osalta kotimaan loppukäyttö ja raaka-ainekulutus keskittyi ennen kaikkea palveluihin (57 %) sekä elintarvikkeisiin ja maataloustuotteisiin (21 %). Kolmanneksi merkittävin tuoteryhmä oli muut jalostetut tavarat (9 %). Yleisesti ottaen palveluiden raaka-aineintensiteetti on tavaroiden intensiteettiä pienempää (Savolainen ym. 2024).

KEITO-WEM-skenaarion mukaiset muutokset energian tuotannossa ja kulutuksessa vuonna 2035 vaikuttavat Suomen kansantalouden materiaalijalanjälkeen erityisesti fossiilisten polttoaineiden kulutuksen kautta. ENVIMAT-laskelman mukaan niiden tuonti vähenee noin 25 miljoonaa tonnia, vienti noin 16 Mt ja kulutus 12 Mt. Biomassan vienti kasvaa (1,1 Mt) ja kulutus pienenee hieman (-1,3 Mt). Maa- ja kiviainesten kulutus kasvaa noin 1,4 Mt. Raaka-aineiden kokonaiskulutus (RMC) on vuonna 2035 WEM-skenaariossa 229 Mt, kun se vertailuvuonna 2019 oli 241 Mt. Raaka-aineiden kulutus vähenee WEM:ssä siis noin 5 prosenttia. WAM-skenaariota ei erikseen mallinnettu, mutta erot energiantuotannossa ja -kulutuksessa ovat WEM:iin nähden niin pieniä, että niiden vaikutukset materiaalien käyttöön eivät ole merkittäviä.

Sähköistäminen ja energiatehokkuuden kasvattaminen lisäävät investointitarpeita uusiin koneisiin, laitteisiin ja elektroniikkaan, mikä puolestaan lisää niiden tuotannon edellyttämien materiaalien ja energian kulutusta.

Digitalisaatio ja älykkäät ratkaisut voivat tehostaa energian ja resurssien kuten luonnonvarojen käyttöä, mutta digitalisaation myötä kasvava datan käyttö toisaalta kasvattaa energian kulutusta ja päästöjä (Lange ym. 2020). Ne saattavat jakaantua globaalisti epätasa-arvoisesti ja aiheuttaa hiilivuotoa (Toivonen 2021). Digitalisaation myötä saavutettava työvoiman ja energian käytön tehostuminen ei siis automaattisesti johda energiakulutuksen pienenemiseen, vaan saattaa lisätä kulutusta toisaalla (rebound effect), minkä lisäksi digitalisaation hyödyt tulevat usein jo olemassa olevan tuotannon päälle (Lange ym. 2020). Mikäli talous palveluvaltaistuu voimakkaasti tulevaisuudessa, voi se osittain hillitä raaka-aineiden kulutusta ja luonnonvarojen tarvetta.

Fossiilisten polttoaineiden ja raaka-aineiden korvaaminen energiantuotannossa, liikenteessä ja teollisuudessa kasvattaa biomassojen ja biopohjaisten sivuvirtojen kysyntää erityisesti kemianteollisuudessa ja metsäteollisuudessa (Paloneva & Takamäki 2020). Hakkuiden intensiteetin ja biomassan korjuun lisääntyminen vaikuttaa metsien hiilinielun ja -varaston kokoon sekä luonnon monimuotoisuuteen ja sen ylläpitämiin ekosysteemipalveluihin, vaikkakin valitut metsähoito- ja käsittelytavat säätelevät osittain vaikutuksen suuruutta (Forsius ym. 2023, Verkerk ym. 2014, Junttila ym. 2023, Mäkelä ym. 2023).

Materiaalikiertojen lisäyksellä sekä jätöpohjaisten ja puupolttoaineiden biomassavirtojen lisääntyvällä hyödyntämisellä voidaan tehostaa luonnonvarojen käyttöä ja osittain vähentää haitallisia ympäristövaikutuksia. Tuontibiomassan määrän kasvu voi, raaka-aineesta ja sen alkuperästä sekä tuotantotavasta ja -skaalasta riippuen, lisätä haitallisia vaikutuksia muun muassa maankäyttöön, metsäkatoon, ruoan tuotantoon, veden käyttöön, luonnon monimuotoisuuteen sekä ilmastomuutokseen sopeutumiseen liittyen.

7.7.2 Vähäpäästöisten teknologioiden materiaaliterve ja tuotannon ympäristö- ja sosiaaliset vaikutukset

Vähäpäästöisiin energiateknologioihin, kuten aurinko- ja tuulivoimaan, sähköajoneuvoihin sekä energian varastointijärjestelmiin, siirtyminen on välttämätöntä ilmastomuutoksen torjumiseksi, mutta siirtymä ei ole materiaaliterveiltään eikä vaikutuksiltaan vähäistä. Siirtymä edellyttää mittavia määriä kriittisiä mineraaleja, joiden tuotanto ja saatavuus tulee varmistaa kestäväällä, ympäristöllisesti vastuullisella ja sosiaalisesti hyväksyttävällä tavalla. Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) ja Euroopan komission yhteinen tutkimuskeskus (JRC) ovat arvioineet, että erityisesti useat EU:nkin kriittisiksi listaamat raaka-aineet (Euroopan komissio 2024) ovat keskeisessä roolissa näiden teknologioiden valmistuksessa ja käyttöönotossa (IEA 2021, JRC 2020). Vaikutusten globaali tarkastelu on tässä yhteydessä oleellista, sillä Suomi ja Euroopan unioni ovat voimakkaasti riippuvaisia energiasiirtymän mahdollistavien raaka-aineiden, komponenttien ja laitteiden tuonnista.

Eri teknologiat vaativat erityyppisiä mineraaleja vaihtelevina määrinä²³. Esimerkiksi sähköautojen akut sisältävät merkittäviä määriä litiumia, kobolttia, nikkeliä ja grafiittia. Sähköauton akku voi vaatia jopa 60 kg litiumkarbonaattia, 15 kg kobolttia ja 30 kg nikkeliä (IEA 2021). Myös uusiutuvan energian tuotantolaitteet, kuten tuuliturbiinit ja aurinkopaneelit, sisältävät runsaasti metalleja. Tuulivoimassa käytettävät kestopagneetit vaativat harvinaisia maametalleja, kuten neodyymiä ja dysprosiumia. Aurinkopaneelien valmistuksessa hyödynnetään muun muassa piitä, telluuria ja indiumia (JRC 2020). Vuoden 2025 IEA Global Critical Minerals Outlook -raportin mukaan kriittisten mineraalien kysyntä on kasvanut vuosina 2017–2022 yli kaksinkertaiseksi, ja kehitys jatkuu nopeana. Litiumin kysyntä on kasvanut jopa 6-kertaiseksi viidessä vuodessa, mikä johtuu ennen kaikkea autokannan sähköistymisestä (IEA 2025). IEA arvioi, että vuoteen 2030 mennessä sähköautojen ja energiavarastojen akuissa tarvittavan litiumin, nikkelin ja kobolttin yhteenlaskettu kysyntä voi nousta jopa 3–7-kertaiseksi vuoden 2022 tasoon verrattuna, riippuen siitä, kuinka kunnianhimoisesti energiasiirtymä etenee.

Euroopan komission on tunnistanut 37 mineraalia ja metallia niin sanotuiksi kriittisiksi raaka-aineiksi (CRM, Critical Raw Materials). Näillä raaka-aineilla on Euroopan unionin alueella korkea taloudellinen merkitys ja samalla korkea toimitusriski. Näihin kuuluvat muun muassa litium, koboltti, grafiitti, harvinaiset maametallit sekä platinaryhmän metallit (Euroopan komissio 2024, GTK 2025). Lisäksi komissio on listannut strategiset raaka-aineet²⁴, jotka ovat erityisen tärkeitä energia- ja digitaalisen siirtymän sekä puolustusteknologian kannalta. Näistä monen tuotanto on keskittynyt muutamaan maahan – esimerkiksi yli 70 % harvinaisten maametallien jalostuksesta tapahtuu Kiinassa – mikä altistaa toimitusketjut geopoliittisille riskeille (JRC 2020).

Energiasiirtymään tarvittavien teknologioiden taustalla olevat mineraali- ja komponenttituotannon toimitusketjut ovat usein monimutkaisia, globaalisti hajautuneita ja vaikeasti jäljitettävissä. Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) korostaa, että toimitusketjujen läpinäkyvyyden puute on yksi keskeisistä esteistä kestävä ja vastuullisen mineraalihuollon kehittämisessä (IEA 2022). Erityisesti kaivostoiminnan alkuperän, ympäristövaikutusten, työolosuhteiden ja ihmisoikeusriskien tehokas seuranta on vaikeaa, mikä altistaa markkinat eettisille

²³ Esim. tuulivoimaloiden rakentamisessa käytettäviä kriittisiä materiaaleja ovat mm. dysprosium (Dy), neodyymi (Nd), molybdeeni (Mo), kromi (Cr), nikkeli (Ni) ja magnesium (Mg). Aurinkopaneelien valmistuksessa puolestaan telluuri (Te), indium (In), tina (Sn), hopea (Ag), gallium (Ga), germanium (Ge), seleeni (Se) ja rutenium (Ru). (Leskinen ym. 2014)

²⁴ EU:n energia- ja digitaaliselle siirtymälle, sekä puolustukselle strategiset raaka-aineet: Bauksiitti (alumiinimalmi), vismutti, metallurginen boori, koboltti, kupari, gallium, germanium, akkulaatuinen litium, magnesiummetalli, akkulaatuinen mangaani, akkulaatuinen grafiitti, akkulaatuinen nikkeli, platinametallit, kestopagneetteihin käytettävä harvinaiset maametallit (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm, and Ce), metallinen pii, titaanimetalli, volframi.

ja taloudellisille riskeille. Läpinäkyvyyden puutteet voivat johtaa muun muassa epäeettisten toimintatapojen, kuten lapsityövoiman, pakkotyön tai ympäristön laiminlyönnin, jäämiseen huomaamatta toimitusketjuissa. IEA (2022) painottaa, että erityisesti pienimuotoisen kaivostoiminnan osuus joissain maissa, kuten Kongon kobolttituotannossa, lisää jäljitettävyyshaasteita. Lisäksi materiaalien jälkikäsitteily ja jalostus tapahtuvat usein kolmansissa maissa, joissa sääntely voi olla heikkoa tai valvonta puutteellista. IEA:n (2025) mukaan mineraalien toimitusketjut ovat myös rakenteellisesti alttiita häiriöille, koska investoinnit uusiin kaivoksiin, jalostuslaitoksiin ja kierrätysinfrastruktuuriin etenevät hitaammin kuin materiaalikyky kasvaa. Raportti korostaa erityisesti tarvetta monipuolistaa toimituslähteitä ja rakentaa strategisia varmuusvarastoja kriittisille mineraaleille.

Euroopan unioni on reagoinut toimitusketjujen läpinäkyvyyden haasteisiin säätämällä pakollisen yritys vastuun velvoitteen osana toimitusketjusääntelyä. EU:n uusi yritys vastuudirektiivi (Corporate Sustainability Due Diligence Directive, CSDDD; Directive 2024/1760) astui voimaan toukokuussa 2024 ja velvoittaa suuret yritykset tunnistamaan, ehkäisemään ja lieventämään ihmisoikeuksiin ja ympäristöön liittyviä haitallisia vaikutuksia omassa toiminnassaan ja arvoketjuissaan. Direktiivi kattaa myös kriittisten raaka-aineiden toimitusketjut ja voi parantaa merkittävästi niiden läpinäkyvyyttä ja vastuullisuutta (Euroopan komissio 2024). Läpinäkyvyyden lisääminen vaatii investointeja digitaalisiin jäljitettävyyssratkaisuihin, kuten lohkoketju-teknologiaan, sekä yhteistyötä eri toimijoiden, kuten hallitusten, kansalaisjärjestöjen ja teollisuuden kesken. Samalla on tärkeää varmistaa, ettei läpinäkyvyyden vaatiminen sulje pois pienempiä toimijoita kehittyvissä maissa, vaan että siirtyä vastuulliseen kaivostoimintaan tapahtuu oikeudenmukaisesti ja inklusiivisesti (IEA 2022).

Materiaalitarpeiden kasvu aiheuttaa sekä taloudellisia että ekologisia haasteita. Kaivostoiminta ja mineraalien jalostus kuluttavat energiaa ja vettä sekä voivat aiheuttaa merkittäviä ympäristö- ja sosiaalisia haittoja. Samalla raaka-aineiden louhinta voi johtaa konflikteihin paikallisyhteisöjen, alkuperäiskansojen ja valtioiden välillä. Sosiaalisen oikeudenmukaisuuden huomioiminen ja vastuullinen hankinta ovat keskeisiä kestäväsiirtymän onnistumiselle. Tulevaisuudessa on tärkeää panostaa kiertotalouteen, materiaalitehokkuuteen ja teknologisiin innovaatioihin. Esimerkiksi akkujen kierrätyksen tehostaminen ja vaihtoehtoisten materiaalien kehittäminen voivat vähentää riippuvuutta neitseellisistä raaka-aineista. EU onkin lanseerannut useita ohjelmia kiertotalouden ja kriittisten raaka-aineiden saatavuuden turvaamiseksi (Euroopan komissio 2024). IEA (2025) korostaa, että kierrätyksen rooli korostuu erityisesti pitkällä aikavälillä.

Ympäristövaikutukset

Mineraalien tuotanto ja jalostus vaikuttavat monin tavoin ympäristöön, ja vaikutusten mittakaava kasvaa kysynnän kasvaessa. Merkittäviä vaikutuksia kohdistuu erityisesti veden käyttöön, energiankulutukseen sekä ilmastopäästöihin. Useiden kriittisten mineraalien louhinta on vedenkulutuksen suhteen erittäin intensiivistä. Esimerkiksi litiumin tuotanto suola-aavikoilla (kuten Chilessä)

tapahtuu haihdutusaltaissa, jotka vaativat suuria määriä pohjavettä. Tämä puolestaan heikentää paikallisten ekosysteemien ja yhteisöjen vesivarantoja (IEA 2021). Mineraalien kaivostoiminta, murskaus, rikastus ja jalostus ovat energiantensiivisiä prosesseja. Monilla alueilla näihin prosesseihin käytetään fossiilisia polttoaineita, mikä kasvattaa niiden hiilijalanjälkeä. Esimerkiksi alumiinin ja nikkelin jalostus on erityisen energiantensiivistä (IEA 2025), joskin energian käyttö vaihtelee suuresti tuotantomenetelmän mukaan. Koko mineraalien tuotannon elinkaari aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä. Vaikka vähäpäästöiset teknologiat auttavat vähentämään ilmastopäästöjä käytön aikana, laitteiden valmistuksen päästöt voivat olla merkittäviä. Esimerkiksi sähköauton akun tuotanto voi tuottaa jopa viiden CO₂-ekvivalentti-tonnin päästöt (JRC 2020).

Suomessa kaivostoiminnan ympäristövaikutuksien hallinta on lähtökohtaisesti hyvällä tasolla, ja riskien tunnistaminen ja niihin varautuminen on entisestään parantunut viimeisen kymmenen vuoden aikana (Friedrichs ym. 2025). Kaivostoimijat ovat myös varsin hyvin varautuneet poikkeuksellisten tilanteiden hallintaan (Välisalo ym. 2014). Suomessa kaivostoiminnan riskitekijöiksi on tunnistettu mm. vesien hallinta, patoaltaiden pohjarakenteiden kunnon seuranta ja kaivannaisjätteiden kemiallisen muuttumisen vaikutusten tunnistaminen ja seuranta (Välisalo ym. 2014). Suomalaisen kaivosvastuujärjestelmän (TSM Finland) käyttöönotto on myös auttanut kaivostoimijoita kehittämään toimintatapojaan (Friedrichs ym. 2025).

Luonnonvarojen käytön kasvaessa siirrytään hyödyntämään yhä syvemmällä kallioperässä sijaitsevia ja usein mineraalipitoisuudeltaan köyhempiä esiintymiä, jolloin haluttujen mineraalien rikastaminen vaatii enemmän energiaa ja lisää riskiä tuotantokustannusten, ympäristövaikutusten ja jätemäärien kasvulle. Toisaalta yhä useammin rahoittajat, kuluttajat ja muut sidosryhmät vaativat yrityksiä hankkimaan mahdollisimman kestävästi ja vastuullisesti tuotettuja mineraaleja. Kaikki nämä muutokset vaikuttavat kaivoshankkeiden toteutettavuuteen, kannattavuuteen ja koko prosessin elinkaareen sekä lopulta kuluttajahintoihin. Vastuullisuus onkin nostettu yhdeksi kaivostoiminnan suurimmista riskitekijöistä, johon liittyy samalla valtavasti mahdollisuuksia yritystoimijoille (Friedrichs ym. 2025). Kilpailukyvyn ylläpitämiseksi muuttuvassa toimintaympäristössä toimialalla tarvitaan laajaa ja jatkuvaa kehitystyötä, sekä kansallisia, kansainvälisiä ja toimialan sisäisiä sopimuksia sekä poliittista ohjausta haitallisten vaikutusten vähentämiseksi.

Sosiaaliset vaikutukset

Kriittisten mineraalien tuotantoon liittyy merkittävien sosiaalisten vaikutusten riski. Näitä ovat muun muassa alkuperäiskansojen oikeudet, paikallisyhteisöjen osallistaminen, maanomistuskysymykset sekä ympäristövaikutuksiin ja elinkeinoihin liittyvät sosiaaliset konfliktit. Moniin kaivoshankkeisiin liittyy merkittäviä ympäristö- ja sosiaalisia vaikutuksia, mutta vastaavasti usea kaivoshanke etenee ilman merkittäviä negatiivisia vaikutuksia tai vastustusta (esim. Eerola 2025; Friedrichs ym. 2025). Kaivoshankkeet voivat parhaimmillaan luoda myös positiivisia sosiaalisia vaikutuksia erityisesti syrjäseutujen työllisyyden

ja elinvoiman näkökulmasta (Kivinen & Aumo 2015). Esimerkkinä sosiaalisesti onnistuneista ja pääosin riidattomista kaivoshankkeista voidaan pitää Keliberin Kokkolan kaivoshanketta ja teollisuustoimintoja, Agnico Eagle Finlandin Kittilän kultakaivosta ja tuotantolaitoksia, Kemin kromikaivosta ja tuotantolaitoksia sekä Bolidenin Kevitsan kaivosta. Mihinkään näistä ei liity merkittäviä sosiaalisia konflikteja.

Pahimmillaan kaivostoiminta voi kuitenkin kilpailla voimakkaasti muiden maankäyttömuotojen kanssa ja aiheuttaa merkittäviä ympäristö- ja sosiaalisia vaikutuksia. Esimerkiksi kobolttin tuotanto Kongon demokraattisessa tasavallassa on herättänyt vakavaa huolta lapsityövoiman käytöstä, vaarallisista työoloista ja työoikeuksien puutteista. Serbiassa Rio Tinton suunnittelema Jadar-litiumkaivos (Rio Tinto 2021) on kohdannut voimakasta kansalaisvastustusta ympäristövaikutusten ja avoimuuden puutteen vuoksi. Paikalliset yhteisöt ja ympäristöjärjestöt ovat nostaneet esiin riskejä pohjavesien pilaantumisesta ja maatalouden elinkelpoisuuden heikkenemisestä. Serbian hallitus keskeytti hankkeen vuonna 2022, mikä osoittaa, että sosiaalinen hyväksyttävyys on noussut merkittäväksi investointien riskitekijäksi (IEA 2025). Suomessa AA Sakatti Mining Oy:n Sakatti-hanke Lapissa (Anglo American 2023) on saanut osakseen huomiota, koska suunniteltu nikkeli-, kupari- ja platinametallikaivos sijoittuu osittain suojelualueelle ja poronhoitoalueelle. Yritys on pyrkinyt ratkaisemaan tätä ristiriitaa muun muassa ekologisen kompensaation avulla suojelemalla yksityistä ikimetsää Inarissa (Anglo American 2024).

Vaikka Suomessa kaivostoimintaa säätelevät EU:n ja kansalliset ympäristö- ja lupamenettelyt, sosiaalinen vaikutustenarviointi ja vuoropuhelu paikallisyhteisöjen kanssa on ratkaisevaa hyväksyttävyyden kannalta. Friedrichs ym. (2025) mukaan yritysten sitoutuminen vastuulliseen toimintaan ovat yleisesti ottaen hyvällä tasolla kaivosteollisuudessa Suomessa. Kansallinen vastuullisuusstandardi (TSM Finland), toimialajärjestöjen ja yritysten sitoutuminen, toimien raportointivaatimus sekä vakiintunut kansallinen yritysverkosto luovat vahvan perustan yrityksille hallita ja kehittää toimintatapojaan suomalaisessa toimintaympäristössä.

7.7.3 Kaivosteollisuuden sääntely Suomessa

Vuonna 1965 laadittua kaivoslakia uudistettiin merkittävästi vuonna 2011. Lisää uudistuksia kaivoslakiin (621/2011) tehtiin 1.6.2023, esimerkiksi kaivosluvan myöntämisen edellytyksenä on jatkossa kunnan hyväksymä kaava, malminetsintään liittyvää tutkimusta tiukennettiin varausalueiden voimassaolon lyhennyksellä ja hehtaariperusteisella lupamaksulla sekä etsintälupien jatkolupaprosessin myöntöperusteita tiukennettiin. Muutoksia on tullut myös Luonnonsuojelulakiin 1.6.2023, esimerkiksi varovaisuusperiaatteen ja vapaaehtoisen ekologisen kompensaation muodossa (LSL 9/2023). Näiden lisäksi Ympäristönsuojelulain lisämuutosten valmistelu kaivannaisjätealueiden vakuuksiin liittyen on edelleen käynnissä ja esitystä odotetaan vuoden 2025 aikana.

EU-komissio on myös asettanut kriittisten raaka-aineiden säädöksen (EU 2024/1252), joka astui voimaan toukokuussa 2024. Asetuksessa määritellään 34

kriittistä raaka-ainetta, joista 17 on myös strategisia. Näitä tarvitaan vihreässä siirtymässä, digitalisaatiossa ja puolustusteollisuudessa. Asetuksen tavoitteena on parantaa EU:n omavaraisuutta kasvattamalla EU:n kaivostuotanto 10 %:iin, jalostus 40 %:iin ja kierrätys 25 %:iin vuosittaisesta kulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. Yksittäisestä maasta tuleva tuonti ei saisi ylittää 65 %. Nykyisin useita strategisista ja kriittisistä raaka-aineista tuodaan 90–100 %:sti pelkästään Kiinasta. Toimina asetuksessa on mm. strategisina pidettyjen hankkeiden lupamenettelyjen sujuvoittaminen, kansalliset luvituksen yhteyspisteet, riskien seurantaan liittyvät toimet, kansalliset raaka-aineiden etsintäohjelmat sekä raaka-aineiden uudelleenkäytön parantamiseen tähtäävät toimet. Suomessa komission myöntämän strategisen hankkeen aseman komission ensimmäisessä hakuprosessissa 25.3.2025 ovat saaneet: AA Sakatti Mining Oy (Sakatin kaivoshanke), Terrafame Oy (Kolmisoppi-kaivoksen laajennushanke), Keliber Oy (litiumkaivos ja -jalostamo), Fortum Oyj (akkukierrätyskeskus), Hycamite (grafiittituotantolaitos) ja Jervois Finland Oy (koboltijalostamo).

Suomessa otettiin viime vuonna käyttöön kaivosmineraalivero, jolla korvataan uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä Suomen valtiolle. Metallimalmien vero määräytyy kaivosmineraalin sisältämän metallin määrän ja verotusarvon perusteella, ja se maksetaan kaikista rikastukseen toimitetuista metallimalmeista. Metallimalmien vero on 0,6 % kaivosmineraalin sisältämän metallin verotusarvosta. Muiden kaivosmineraalien vero on 0,20 euroa tonnilta louhittua malmia tai hyötykiveä. Kaivosmineraaliveron tuotosta 60 prosenttia tilitetään niille kunnille, joissa kaivokset sijaitsevat. Loput 40 prosenttia tilitetään valtiolle. Vuonna 2024 veron tuotto oli 31,2 miljoonaa euroa, josta valtion osuus oli 12,5 miljoonaa euroa ja loput jaettiin 20 eri kunnalle.

Kaivosmineraaliveron vaikutusten arvioiminen mineraaliklusterin toimintaan on ollut esillä kansallisen mineraalistrategian valmistelussa (luovutettu hallitukselle joulukuussa 2024), mutta arviointia ei ole vielä tehty. Kaivosteollisuuden tulevaisuuden näkymiin vaikuttaa mahdollisesti myös hallituksen päätös nostaa kaivosmineraaliveroa 50 miljoonalla eurolla sekä sähköveroluokan muutos. Datakeskukset ja kaivokset kuuluvat nykyisin alempaan sähköveroluokkaan II, mutta hallituksen esitys nostaisi ne yleiseen sähköveroluokkaan I. Käytännössä vero nousisi 0,05 sentistä 2,24 senttiin kilowattitunnilta. Muutoksen vaikutuksia kaivossektorin irtaantumiseen fossiilisista päästöistä tai esimerkiksi työkonoiden sähköistymissuunnitelmille ei ole arvioitu. (Valtioneuvosto 2025b).

7.7.4 Resurssitehokkuus ja kiertotalous

WEM- ja WAM-skenaarioissa tapahtuva nykyistä puhtaampi sähkön ja lämmön tuotanto, energiatehokkuuden paraneminen sekä polttoaineiden käyttöä vähentävä sähköistyminen edistävät osaltaan kiertotaloutta ja kansallisten

kiertotaloustavoitteiden²⁵ saavuttamista. Sivutuotteiden ja uusiomateriaalien käyttöä suoraan edistäviä toimia ei sisälly skenaarioihin ja käytön lisääntyminen on oletettu vielä melko vähäiseksi molemmissa skenaarioissa. Kiertotalousasteen ja resurssituottavuuden kasvattaminen vaatii näin ollen tehostamista, jos talouden materiaali-intensiivisyyttä halutaan vähentää ja talouskasvun irtikytkentää raaka-aineiden kulutuksesta vahvistaa. Kiertotalouden edistämisen näkökulmasta hyödyntämätöntä potentiaalia on vielä runsaasti.

Euroopan ympäristökeskus (EEA) on todennut ennusteet (mm. OECD 2019) huomioiden, että merkittävä materiaalien kulutuksen väheneminen EU:ssa tulevan vuosikymmenen aikana on epätodennäköistä (EEA 2024). Kiertotalouden avulla pyritään edistämään niin EU:n ilmastotavoitteiden saavuttamista, luontokadon torjumista, omavaraisuutta, resilienssiä kuin työllisyyttäkin. Euroopan komission kiertotalouden toimintasuunnitelmat vuosilta 2015 ja 2020 (COM/2015/614, COM/2020/98) vaikuttavat muun muassa jätedirektiiviin, kierrätystavoitteisiin, kertakäyttöisten muovituotteiden ja kalastusvälineitä koskeviin sääntöihin ja kiertotalouden mukaisten tuotteiden suunnitteluun. Kiertotalouteen liittyviä EU-aloitteita on tehty kymmenittäin viime vuosina. Esimerkiksi ekosuunnitteluasetus (EU) 2024/1781 pyrkii tekemään tuotteista pitkäikäisempiä ja paremmin tuotannon ympäristövaikutukset ja kiertotalouden näkökohdat huomioon ottavia. Asetukseen sisältyvät digitaalinen tuotepassi ja uudet merkintäsäännöt, myymättömien kuluttajatuotteiden hävityskielto ja tiedonantovelvollisuudet sekä vihreät julkiset hankinnat. Akkuasetus (EU) 2023/1542 puolestaan asettaa velvoitteita kierrätykselle, talteenotolle ja käyttösuuksille sekä korostaa raaka-aineiden vastuullisuutta. EU:n komissio julkaisi helmikuussa 2025 puhtaan teollisuuden ohjelman (Clean Industrial Deal), jonka mukaan komissio pyrkii tekemään vuoteen 2030 mennessä EU:sta maailman johtavan alueen kiertotaloudessa ja kaksinkertaistamaan materiaalien kiertotalousasteen 24 prosenttiin samassa tavoiteajassa (Euroopan komissio 2025c).

Kiertotalouden strategista ohjelmaa toteutetaan muun muassa kiertotalouden green deal -sitoumusten sekä Motiva Oy:n ja Syken ylläpitämän kansallisen osaamisverkoston (Kiertotalous-Suomi eli KiSu) kautta. Vapaaehtoisessa kiertotalouden green dealissa mukaan lähtevät toimijat (yritykset, toimialajärjestöt, kunnat, maakunnat) sitoutuvat vähentämään luonnonvarojen käyttöä, asettamaan vaikuttavia tavoitteita ja toteuttamaan vähähiilistä kiertotaloutta edistäviä toimia. Toimet tukevat kiertotalousohjelman luonnonvaratavoitteiden ja hiilineutraaliuden saavuttamista ja kestävä talouden edistämistä vuoteen 2035 mennessä. (Ympäristöministeriö 2025a). Kansallinen osaamisverkosto tukee kiertotalouden edistämistä kokoamalla yhteen kiertotalouden osaajia, levittämällä tietoa ja hyviä toimintamalleja ja parantamalla toimijoiden valmiuksia edistää kiertotaloutta.

²⁵ Periaatepäätöksessä kiertotalouden strategisesta ohjelmasta (YM/2021/17) on asetettu vuodelle 2035 tavoitteiksi, että kotimaan primaariraaka-aineiden kulutus ei ylitä vuoden 2015 tasoa (vientituotteiden valmistus ei kuulu tavoitteeseen), resurssien tuottavuus on kaksinkertaistunut verrattuna vuoden 2015 tilanteeseen, ja että materiaalien kiertotalousaste kaksinkertaistuu.

Kiertotalous-Suomi ja Green Building Council Finland toimivat lisäksi kotipesinä vapaaehtoisten kiertotalouden green deal-sitoumuksen tehneille organisaatioille. (Ympäristöministeriö 2025b)

Kiertotalousohjelman arvioinnin (Haila ym. 2023) perusteella kiertotalouden tila Suomessa on korkeintaan eurooppalaista keskitasoa, eikä nykyisillä toimilla saavuteta vuodelle 2035 asetettuja kansallisia tavoitteita. Resurssituottavuus on heikko ja materiaalien kiertotalousaste (Eurostat 2025b mukaan Suomen 2,4 % vs. EU:n keskiarvo 11,8 %) on alhainen. Kiertotaloudella on tunnistettu olevan potentiaalia myös kansallisen kriisinsietokyvyn vahvistajana (Frilander ym. 2024).

Kiertotalouden edistämiseksi tarvitaan poliittisia päätöksiä kiertotaloutta tukevan sääntelyn ja taloudellisten kannustimien kehittämiseksi. Parhaillaan valmistellaankin kansallista kiertotalouslakia, joka tulee korvaamaan nykyisen jätelain ja tavoittelee muun muassa jätēsääntelyn ja tuote- ja kemikaalisääntelyn ja jätēsääntelyn suhteen selkeyttämistä, sääntelytaakan keventämistä ja kiertotalouden toimijoiden toiminta- ja investointiympäristön kehittämistä. (Valtioneuvosto 2024)

Kiertotaloustoimenpiteiden vaikutuksia on arvioitu kansainvälisissä tutkimuksissa (muun muassa Ellen MacArthur Foundation 2019, Forslund ym. 2022, Geerken ym. 2019, RESCUE 2019, Material Economics 2018; 2019) ja Suomessa (Seppälä ym. 2016, Ruokamo ym. 2021; 2023, Savolainen ym. 2024). Ruokamo ym. (2021) mukaan kiertotalouden toimenpiteiden avulla voidaan vähentää luonnonvarojen käyttöä ja niiden maankäyttövaikutuksia sekä edistää paitsi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä, myös luontokadon hillitsemistä. Kotimaisina kiertotaloustoimenpiteinä arvioinnissa olivat esimerkiksi metallien, sementin ja betonin käytön optimointi ja uudelleenkäyttö, puumateriaalin kaskadikäytön lisääminen metsäteollisuudessa ja rakentamisessa, rakennusten käyttöä pidentäminen ja tilojen käytön optimointi. Tulevaisuuden päästövähennysmahdollisuuksiksi tunnistettiin lisäksi geopolymeerit sementti- ja betoniteollisuudessa, hiilidioksidin talteenotto- ja hyödyntämisteknologiat (CCU) ja niiden hyödyntäminen esimerkiksi kemian-, metalli-, metsä- ja sementtiteollisuudessa sekä P2X-teknologioiden avulla vähähiilisellä tai päästöttömällä energialla tuotettavat liikennepolttoaineet, proteiinit ja materiaalit (Ruokamo ym. 2021). Savolainen ym. (2024) laativat ensimmäistä kertaa Suomelle tulevaisuuspolut kiertotaloussiirtymän toteutusmahdollisuuksista sekä vaikutuksista ympäristöön ja kansantalouteen. Tutkimuksessa laadittiin vuodelle 2035 kolme luonnonvarojen käytön skenaariota, joihin lisättiin kiertotaloustoimenpiteitä vaiheittain siten, että kunnianhimoisin skenaario pyrki saavuttamaan kiertotalouden strategisen ohjelman luonnonvaratavoitteet sekä Suomen hiilineutraalisuustavoitteen. Kiertotaloustoimet ryhmiteltiin viidelle muutosalueelle (resurssiviisas rakennettu ympäristö, kiertotalouteen perustuva teollisuus, kestävä kulutus ja liiketoiminta, materiaalitehokas energiajärjestelmä ja uudistava ruokajärjestelmä). Tulosten perusteella luonnonvaratavoitteet ovat osin saavutettavissa puhtaan energiasiirtymän alentaessa Suomen päästöjä ja poliittisten päätösten vähentäessä luonnonvarojen käyttöä. Kiertotaloustoimenpiteet voivat edelleen vähentää päästöjä, vahvistaa hiilinieluja

sekä hidastaa luonnon monimuotoisuuden heikkenemistä, taloutta heikentämättä. Raaka-aineiden kulutus asukasta kohden säilyy kuitenkin edelleen globaalisti korkealla tasolla ja resurssituottavuudessa ollaan kaukana EU-maiden keskiarvosta. (Savolainen ym. 2024)

Resurssitehokkuuden ja uusiomateriaalien käytön edistäminen hidastavat ehtyvien luonnonvarojen kulutusta. Materiaalikiertojen toteuttaminen edellyttää kuitenkin energiaa, logistiikkaa ja varastointia. Materiaalien terveydelle tai ympäristölle haitallisten aineiden tunnistaminen ja hallinta materiaalien keräyksessä ja käsittelyssä on tärkeää. Kokonaisvaikutukset resurssien muutosten osalta sekä kustannukset tulisi arvioida tapauskohtaisesti, jotta saavutetaan tehokkaita ja skaalattavia ratkaisuja. Uudet ratkaisut ja tuotteet tarvitsevat myös aitoa markkinakysyntää.

Kiertotalouden edistymisen mittaamisella ja raportoinnilla on keskeinen rooli tavoitteiden asettamisessa, kehityksen osoittamisessa, mahdollisuuksien tunnistamisessa ja vaikutusten osoittamisessa, mutta arvioinnit vaativat edelleen yhdenmukaistamista ja skaalautumista eri toimijoiden välillä (Ellen MacArthur Foundation 2024). Muun muassa Euroopan Komissio on kehittänyt kiertotalouden toimintaa ja vaikutuksia ilmaisevia indikaattoreita (Eurostat 2025b). Tilastokeskus ja Syke ovat tuottaneet myös suomalaisen kiertotalousliiketoiminnan indikaattorikokoelman, jossa kahdeksan toiminnon (design, materiaalien otto, tuotanto, logistiikka, kauppa ja palvelut, kulutus ja jakamistalous, jätteet, uudelleenkäyttö ja kierrätys) alla on kaikkiaan 18 indikaattoria tai indikaattorijoukkoa (Tilastokeskus 2023, Olsson & Pirtonen 2020).

Syke on lisäksi kehittänyt yritysten ja kansalaisten kiertotalousasenteiden ja -toimien seurantaa varten barometrikyselyt. Barometrien tulosten mukaan (Pitkänen ym. 2024) kiertotalous on tunnettu termi, mutta käytännön toimissa painottuvat jätteiden lajittelu. Esimerkiksi jakamistalouden mahdollisuudet ovat vielä vähemmän tunnettuja, mutta kiertotaloutta kohtaan on kiinnostusta ja toiminnan laajentamiselle on näin ollen potentiaalia.

7.8 Luonnon monimuotoisuus

Hallitusten välinen luontopaneeli (IPBES 2019) on määritellyt luonnon monimuotoisuuden olevan kaikissa maa- ja ekosysteemeissä elävien eliöiden ja eliöitä sisältävien ekologisten kokonaisuuksien vaihtelevuutta. Luonnon monimuotoisuutta voidaan tarkastella esimerkiksi lajien lukumäärillä ja yksilörunsauksilla sekä lajimäärät ja eri lajien yksilörunsaudet huomioivilla monimuotoisuusindekseillä (Díaz & Malhi 2022).

Ilmastonmuutos ja luonnon monimuotoisuuden heikentyminen vaikuttavat elinympäristöjen ja -lajistojen lisäksi myös ihmisten elämänlaatuun ja taloudelliseen toimintakykyyn. Ilmastonmuutoksen voimistuminen vahingoittaa ekosysteemien toimintakykyä ja voi hallitsemattomana useiden kriittisten

keikahduspisteiden (ns. tipping points)²⁶ realisoituessa johtaa äkillisiin ja peruuttamattomiin muutoksiin, kuten kykyyn kasvattaa tärkeimpiä perusviljelykasveja (Soimakallio ym. 2021). Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin (IPCC) ja kansainvälisen luontopaneelin (IPBES) yhteisraportti (Pörtner ym. 2021) toteaa, että jo nykyinen ilmastomuutoksen vaikutusten voimistuminen uhkaa ekosysteemien tasapainoa ja hillintätoimien tehokkuutta, jos maankäyttösektorin merkittävästi hiiltä sitovat ja lajirikkaat ekosysteemit kuten metsät, kosteikot ja suot katoavat tai oleellisesti heikkenevät. Ilmastomuutoksen sopeutumisen ja hillinnän onnistuminen edellyttää siis luontokadon eli luonnon monimuotoisuuden heikkenemisen pysäyttämistä, sillä monimuotoisuus tekee eliöstön vastustuskykyisemmäksi ja sopeutuvammaksi ympäristössä tapahtuvia muutoksia kohtaan. Luontokadon ja ilmastomuutoksen synergiat ja mahdolliset ristiriidat on tärkeää huomioida osana kaikkia hillintätoimia, mutta erityisesti metsien ja maatalouden kohdalla niiden merkitys on ratkaiseva.

Uhanalaisuusarviointien mukaan Suomen luontotyypeistä joka toinen (Kontula & Raunio 2018) ja lajeista joka yhdeksäs (Hyvärinen ym. 2019) on uhanalainen. Uhanalaisten lajien ja luontotyyppien osuudet ovat suurimpia metsissä ja perinneympäristöissä, ja Suomen eteläosissa, missä myös maankäytön paineet ja lajimäärät ovat suurimmat. Uhanalaistuminen on lisääntynyt nopeimmin tuntureilla, missä ilmastomuutoksen vaikutukset näkyvät selvimmin. Vesistöissä tilanne on heikoin rannikoilla, virta- ja pienvesissä. Metsäisten luontotyyppien pirstoutuminen ja laadullinen heikentyminen sekä häviäminen rakentamisen, intensiivisen metsätalouskäytön ja pellonraivauksen seurauksena ovat merkittävimpiä luonnon monimuotoisuuden uhkia Suomessa. Esimerkiksi yksipuoliset metsitystoimet tai kasvinviljely bioenergiaksi laajoilla alueilla heikentävät monimuotoisuutta, sillä yksipuoliset viljelykierrot vähentävät maaperän orgaanisen hiilen määrää. Tehostunut maankäyttö voi rikkoa ja tiivistää maaperän rakennetta ja heikentää kasvukuntoa eli viljavuutta (Rytteri ym. 2024). Haitallisia vaikutuksia voi kohdistua paikallisen ekosysteemin tilaan ja lajistoon, vedenkiertoon, ruoan tuotantoon sekä paikallisen yhteisön mahdollisuuksiin harjoittaa elinkeinojaan. Toimet voivat lisäksi heikentää alueen eliöstön ja ekosysteemin kykyä sopeutua ilmastomuutoksen vaikutuksiin.

Tuuli- ja rantakerrostumista Suomessa luontoarvoiltaan erityisen arvokkaita ovat luonnontilaiset hiekkarannat sekä rannikkoalueiden dyynit (mm. Hankoniemi, Yyteri, Kalajoki), joilla eliölajien runsaus on varsin huomattava (Mäkinen ym. 2011). Kaikkien edellä mainittujen bio-/geodiversiteetiltään ja maisemallisilta arvoiltaan merkittävien alueiden maankäyttö on tänä päivänä vaihtelevaa, ja niiden

²⁶ Lenton ym. (2023) mukaan maapallon kriittisiä keikahduspisteitä ovat Grönlannin ja Länsi-Antarktiksien jäätiköt, lämpimien vesien koralliriutat, Pohjois-Atlantin subpolaarinen pyörrevirtaus ja ikiroudan alueet. Suomi sijaitsee arktisella alueella, jossa monet muutoksista voivat olla merkittäviä. Suomi sijaitsee arktisella alueella, joka lämpenee noin kolme kertaa maapallon keskilämpötilaa nopeammin (Zhou ym. 2024).

sijainti tulisikin huomioida kaavoissa sekä tarkasti pohtia millaisia aluevarauksia ja osa-aluemerkintöjä niille tehdään.

Ilmastotoimien hyöty- ja haittasuhteita sekä muita yhteiskunnallisia vaihtosuhteita tulisi tarkastella kokonaisuutena. Yhteisvaikutuksien arvioimista tarvitaan myös esimerkiksi uusiutuvien energiamuotojen kohdalla, mikäli ne lisäävät merkittävästi kaivostoimintaa tai edellyttävät laajojen maa-alueiden käyttöönottoa. (Pörtner ym. 2021) Globaalit luontokatovaikutukset voivat kytkeytyä Suomen ilmastotoimiin muun muassa erilaisten raaka-aineiden tuonnin kautta.

Metsälaki, luonnonsuojelulaki ja vesilaki turvaavat osaltaan monimuotoisuuden kannalta erityisen tärkeitä elinympäristöjä. EU:n biodiversiteettistrategian (COM/2020/380 final) tavoitteena on vuoteen 2030 mennessä pysäyttää luontokato ja kääntää luonnon monimuotoisuuden kehitys myönteiseksi. Lisäksi strategiassa on suuri joukko kunnianhimoisia ennallistamistavoitteita, joista merkittävimmistä suunnitellaan jäsenmaita sitovaa lakialoitetta. Strategiassa korostetaan luontokadon pysäyttämisen ja ilmastomuutoksen hillinnän välisiä yhteyksiä muun muassa kohdentamalla suojelua erityisesti hiilirikkaisiin elinympäristöihin. Suomen kansallisen monimuotoisuusstrategian laatimisesta on säädetty luonnonsuojelulaissa (9/2023), jonka mukaan strategiassa asetetaan luonnon monimuotoisuuden vähenemisen pysäyttämiseksi ja tilan parantamiseksi valtakunnalliset toiminnalliset, määrälliset ja ajalliset tavoitteet. Strategian valmistelu on kirjattu PM Orpon hallitusohjelmaan, mutta kansallinen luonnon monimuotoisuuden strategian ja toimintaohjelman valmistelu on edelleen kesken (Lehtomäki 2024). Suomen Luontopaneelin raportin mukaan monimuotoisuutta voidaan parantaa esimerkiksi lisäämällä niittyjä ja viljelemättömiä alueita ja edistämällä luomutuotantoa (Lehikoinen ym. 2024).

Jäsenmaita sitova EU:n ennallistamisasetus astui voimaan elokuussa 2024. Asetuksella on tarkoitus parantaa luonnon tilaa sekä edistää luonnon monimuotoisuuden pitkäaikaista ja kestävää elpymistä maa- ja merialueilla. Ennallistamisasetuksen yleisenä tavoitteena jäsenvaltioiden kesken on ennallistamistoimien käyttöönotto koko EU:n alueella niin, että vähintään 20 prosenttia asetuksen soveltamisalaan kuuluvista maa- ja merialueista sekä ekosysteemeistä katetaan vuoteen 2030 mennessä, ja kaikki ennallistamisen tarpeessa olevat ekosysteemit vuoteen 2050 mennessä. Suomen kansallinen ennallistamissuunnitelma tulee esittää EU-komissiolle elokuuhun 2026 mennessä. Suunnitelmaan tullaan sovittamaan yhteen ennallistamistavoitteet, vaikutukset elinkeinoille sekä Suomen yritysten kilpailukyky talouden reunaehdot huomioiden. Toimeenpanon alkuvaiheessa priorisoidaan suojelualueilla ja valtion mailla toteutettavia toimia ja vapaaehtoiset keinot ovat keskeinen osa keinovalikoimaa. (Ympäristöministeriö 2025c)

Luonnon monimuotoisuuteen vaikuttavat haitat ovat paikallisia ja niihin vaikuttavat suoran maan- ja vesistönkäytön muutosten lisäksi myös luonnonvarojen käytössä, tuotantotoiminnassa ja hoitokäytännöissä ja tapahtuvat muutokset. Paikallisia vaikutuksia aiheutuu sekä siellä, missä raaka-aineita esimerkiksi puhtaan energian investointeja varten tuotetaan, että siellä, missä investoinnit toteutetaan. Esimerkiksi Svensk Vindenergin teettämän arvioinnin

mukaan tuulivoimaloiden rakennusmateriaalien kuten teräksen, kuparin ja alumiinin tuotannon luontovaikutukset ovat merkittävämmät kuin tuulivoimarakentamisen paikalliset luontovaikutukset (Svensk Vindenergi 2024). Investointien elinkaaristen vaikutusten vertailu voi kuitenkin olla hankalaa johtuen vaikutusten paikallisesta luonteesta ja riippuvuudesta muista toimista ja niiden vaikutuksista.

Monimuotoisuusvaikutuksia säännellään lupamenettelyjen, ympäristövaikutusten arvioinnin, kaavoituksen ja monimuotoisuutta turvaavien säännösten kautta. Nykyisessä sääntelyssä esimerkiksi kaikki tuuli- ja aurinkovoimahankkeet eivät kuitenkaan ole YVA-menettelyn piirissä, eikä niin sanottuja no-go-alueita tunnisteta. (Pihlainen ym. 2024)

Pihlainen ym. (2024) mukaan nykyisessä suunnittelu- ja toteutuskäytännössä ei arvioida riittävästi uusiutuvan energian kokonaisvaikutuksia luonnon monimuotoisuuteen. Hankkeiden sijoittumista koskevat päätökset ovat usein kuntakohtaisia, jolloin maakuntatason tarkastelu jää tekemättä. Kokonaisvaikutusten arviointi ei ole minkään ohjauskeinon tai vastuutahon piirissä. Tuotantoaluekohtaisia negatiivisia luontovaikutuksia voidaan kuitenkin minimoida hyvällä kaavoituksella ja harkitulla sijoittamisella sekä luontoa säästävien toteutustapojen kautta (Pihlainen ym. 2024). Taloudellisella ohjauksella kuten luontohaittamaksulla, investointitukien suuntaamisella ja tukiehdolla voitaisiin ohjata hankealueiden sijoittumista ja toteutustapoja, ja torjua myös pistemäisistä haitoista kumuloituvia kokonaisvaikutuksia. Väistämättömiä jäljelle jääviä luontohaittoja voi pyrkiä hyvittämään ekologisella kompensatiolla²⁷ eli hyvittämällä jollakin alueella aiheutettu luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen toisella alueella tehdyllä luonnon monimuotoisuuden lisäämisellä. Aiheutettu luontohaitta ja -hyvitys tulee määrittää, ja laskennalle on kehitetty menetelmiä ja ohjeita (BOOST 2025, Pekkonen ym. 2025, Jalkanen ym. 2025) Monimuotoisuutta tukevat (vapaaehtoiset) toimet hankealueilla voivat lisäksi jossain määrin vähentää aiheutuvaa luontohaittaa. Toimialaliitot ovat myös laatineet luontotiekarttoja vauhdittamaan yritysten toimia biodiversiteetin vahvistamiseksi (EK 2024a).

7.8.1 Metsät

Metsät ovat maamme laajin elinympäristötyyppi. Suomen luontotyyppien uhanalaisuusarvioinnissa metsäluontotyypeistä kolme neljäsosaa arvioitiin uhanalaisiksi ja viidennes silmälläpidettäväksi, vanhojen metsien ja karujen kasvupaikkojen ollessa kaikkein uhanalaisimpia luontotyypejä (Kouki ym. 2018). Ojitus sekä metsien uudistamis- ja hoitotoimet ovat keskeisiä syitä puustoisten suoluontotyyppien, erityisesti korprien, tilan heikkenemiseen ja uhanalaistumiseen

²⁷ Luonnonsuojelulaki (LSL, 9/2023, luku 11) ja ympäristöministeriön asetus vapaaehtoisesta ekologisesta kompensatiosta (933/2023) säättävät mm. vapaaehtoisen ekologisen kompensaaion menettelyjä, hyvittämisen kriteerejä sekä heikennyksen ja hyvityksen mittaamista.

(Kaakinen ym. 2018). Muutos on ollut voimakkainta rehevillä soilla, missä vedenpinnan lasku ja puuston voimakkaasta kasvusta aiheutuva varjostuksen lisääntyminen heikentävät märkiin ja avoimiin olosuhteisiin sopeutuneen lajiston olosuhteita nopeasti (Ojanen ym. 2021).

Suomen lajeista yli 40 prosenttia elää metsissä, uhanalaisista lajeista lähes kolmasosa. Metsälajiston uhanalaistumiskehityksen aiheuttajia ovat erityisesti metsätaloudesta johtuvat vanhojen metsien, lahoppuun ja metsäluontoa uudistavien luonnollisten häiriöiden, kuten palojen, väheneminen (Kärkkäinen ym. 2021). Vanhojen ja kookkaiden puiden sekä muun muassa metsien ikärakenteen nuorentumisesta johtuva lahoppuun vähenemä vaikuttavat keskeisesti noin kolmannekseen uhanalaisista ja silmälläpidettävistä metsälajista. Luonnollisten häiriöiden vähenemä on johtanut lehtipuumetsien harvinaistumiseen ja lehtojen kuusettumiseen, mikä aiheuttaa taantumista noin neljännekselle metsälajeista. (Hyvärinen ym. 2019)

Luonnon monimuotoisuuteen ja metsäkatoon vaikuttavat erityisesti hakkuiden, rakentamisen ja pellonraivauksen määrät ja niiden kohdentuminen turve- ja kivennäismaille, hakkuiden toteutustapa ja metsään jäävän lahoppuun määrä (mm. Auvinen ym. 2020, Assmuth ym. 2022).

Metsänhoitomenetelmistä jatkuvapeitteinen kasvatus tuottaa keskimäärin jaksollista kasvatusta enemmän hiilensidontaa ja muita ekosysteemipalveluja (Gamfeldt 2013, Pukkala 2016, Peura ym. 2018). Hyötyjen kannalta keskeistä on millaisille alueille ja millaisiin metsiin se kohdentuu ja kuinka hakkuut toteutetaan (Saaristo & Pasanen 2020). Metsäluonnon monimuotoisuuden säilymiseen voidaan vaikuttaa myös talousmetsien luonnonhoidolle asetetuilla tavoitteilla, joihin kuuluvat arvokkaiden elinympäristöjen säästäminen, lajiesiintymätiedon huomiointi, lahoppuun ja säästöpuiden jättäminen metsään, metsärakenteen monipuolistaminen, luonnonhoidollinen kulutus ja vesien suojelumenetelmät (Saaristo ym. 2017, Peltola ym. 2014).

Runkopuun tilastoidut hakkuukertymät ovat vaihdelleet 68 ja 78 miljoonan kuutiometrin (Mm^3) välillä vuosina 2015–2023, viimeisimmän viiden vuoden (2019–2023) keskiarvon ollessa 73 Mm^3 . Se on noin 14 Mm^3 enemmän kuin vuosina 2000–2009 hakattiin keskimäärin. (Luke 2025) WEM- ja WAM-skenaarioissa on oletettu nousevan $80\text{--}82 \text{ Mm}^3$:iin vuodessa kaudella 2029–2038 (ks. luku 2.5.2). WEM-skenaariossa on oletettu MISU:n tavoitteiden mukaiset toimet; tuhkalannoituksen ja kivennäismaametsien lannoituksen edistäminen, kunnostusojitusten välttäminen ja säästöpuiden hehtaarikohtaisen määrän lisäys. WAM-skenaariossa ei ole oletettu lisätoimia metsien osalta.

WEM- ja WAM-skenaarioiden mukaisilla hakkuutasoilla on todennäköisesti hyvin haasteellista tai mahdotonta kyetä toteuttamaan puuntuotanto kestäväällä tavalla siten, että metsien hiilinielua pystytään kasvattamaan ja samalla täyttämään EU:n biodiversiteettistrategian tavoitteet. Kärkkäisen ym. (2021) mukaan suojelun, luonnonhoitotoimien ja hakkuiden samanaikainen voimakas lisääminen johtaisi talousmetsien nuorentumiseen ja puuston tilavuuden huomattavaan pienenemiseen seuraavan 30 vuoden aikana. Samalla metsät muuttuisivat hiilinielusta voimakkaaksi päästöjen lähteeksi. Näin kävisi myös

WEM- ja WAM-skenaarioissa oletetuilla hakkuutasoilla, vaikkei niissä suojelupinta-alaa lisätäkään.

Teollisen mittakaavan aurinko- ja tuulivoimarakentamista kohdentuu enenevässä määrin metsäisille luontotyypeille. Tämä voi lisätä luontokatoriskiä, koska rakennetun maa-alan lisääntyessä metsälajien elinympäristöjä katoaa ja pirstoutuu entistä eristyneemmiksi saarekkeiksi (ks. myös luku 7.11.5). Ekologisten yhteyksien häviäminen lisää paikallisten kasvi- ja eläinpopulaatioiden sukupuuttoriskiä. Voimala-alueiden karttaminen sekä lepakoiden ja lintujen törmäysriskin kasvu on myös tunnistettu merkittäväksi luontohaitaksi. Maanomistajia voitaisiin kannustaa kokonaiskestävään toimintaan kehittämällä taloudellisia ohjauskeinoja, joissa monimuotoisuuden turvaaminen ja ilmastomuutoksen torjunta eivät ole keskenään ristiriidassa (Tolvanen ym. 2025).

7.8.2 Maatalous

Maatalousluonnon monimuotoisuutta heikentäviä tekijöitä ovat ennen kaikkea viljelyn tehostamisen ja karjatalouden keskittymisen myötä tapahtunut maatalousmaiseman rakenteen yksipuolistuminen ja vähentynyt laidunnus. Monimuotoisuuden heikentymisen myötä lajikirjo on kaventunut ja muun muassa lintujen, pölyttäjähönteisten ja perhosten lukumäärät ovat laskeneet. Luonnon monimuotoisuuden säilymisellä on merkittävä rooli tärkeiden ekosysteemipalvelujen kuten viljelykasvien pölytyksen ja biologisen torjunnan ylläpidossa ja maatalousympäristön lajien säilymisessä sekä maataloustuotannon sopeutumisessa ilmastomuutoksen vaikutuksiin. Monimuotoisuuden turvaamisessa tärkeiden toimien, kuten perinnebiotooppien, monivuotisten niittyteltojen ja luonnonhoitopeltojen lisääminen ja ylläpito, pinta-alat ovat toistaiseksi jääneet alhaisiksi toimiin liittyvien kustannusten ja lisärahoituksen puuttumisen vuoksi. (Hyvönen ym. 2020)

Aurinkovoimarakentamisella on potentiaalisesti merkittäviä positiivisia vaikutuksia maatalousalueiden monimuotoisuuteen. Paneelientien sopivalla hoidolla on mahdollista lisätä kasvien ja pölyttäjähönteisten monimuotoisuutta ja elinvoimaisuutta (Blaydes ym. 2022, Walston ym. 2021). Tuulivoimaloiden yhteydessä monimuotoisuushyötyjä voidaan vastaavasti saavuttaa luomalla uusia paahdeympäristöjä.

WEM- ja WAM-skenaarioissa tuotantoeläinten määrä pysyy lähes nykyisenä, mutta lannan hyödyntäminen biokaasun tuotannossa kasvaa. Täsmäviljelyn ja kerääjäkasvien avulla vähennetään typpilannoituksen tarvetta ja typen huuhtoumaa sekä lisätään maaperän hiilisyötettä. WEM-skenaariossa maankäyttösektorin toimenpiteinä ovat turvepeltojen metsitys, vettäminen ja kosteikkoviljely (MISUn mukaisesti). WAM-skenaariossa lisätään vuodesta 2035 eteenpäin vettämistä (22 500 ha) ja kosteikkoviljelyä (12 500 ha) sekä huonotuottoisten turvepeltojen metsitysalaa.

Ennallistamisella voidaan saavuttaa useita soiden tuottamien ekosysteemipalvelujen hyötyjä (Kareksela ym. 2021). Esimerkiksi metsittämällä tai vettämillä tehtävä heikentyneiden maaekosysteemien palauttaminen

luonnontilaiseksi voi edistää hiilensidontaa, tulvien säätelyä ja rannikoiden suojelua, vähentää eroosiota, parantaa veden laatua ja tukea kasvien pölytystä. Ennallistamisella voidaan lisäksi luoda toimeentuloa ja uusia työpaikkoja. (Pörtner ym. 2021) Kuivatetun suon ennallistamisessa on mahdollista, että ojituksen vaikutukset jatkuvat pitkään ja itsekseneen vettyvät suot jäävät suhteellisen kuiviksi eli korprien ja rämeiden kaltaisiksi. Tällöin suoluonnon monimuotoisuuden kannalta arvokkaat märät ja avoimet suot eivät palaudu ja jäävät erityisesti harvinaisten lajien tai luonnontilaisen tyyppivaihtelun osalta heikommiksi (Ojanen ym. 2021, Kareksela ym. 2021, Saarimaa ym. 2019).

7.9 Maaperä, pohjavesi ja vesistöt

7.9.1 Maaperä ja pohjavesi

Euroopan unionin jäsenmaat, Euroopan parlamentti ja EU:n komissio pääsivät 10.4.2025 alustavaan sopuun maaperän seurantaan ja resilienssiä koskevasta direktiivistä, jolla tavoitellaan tervettä maaperää vuoteen 2050 mennessä. Direktiivillä pyritään parantamaan maaperän tilan seurantaan, lisäämään tietoa pilaantuneista maa-alueista ja vähentämään pilaantumisen aiheuttamia riskejä. Maaperän tilaa heikentävät esimerkiksi eroosio, ravinteiden ylijäämä, tiivistyminen ja haitalliset aineet. Terve maaperä on olennainen osa ilmastomuutoksen hillintää, ilmastomuutokseen sopeutumista, luontokadon torjuntaa sekä edellytys ihmisten hyvinvoinnille ja ruokaturvalle (Ympäristöministeriö 2025d).

Energiasiirtymän toteutuminen ja sen mukana tapahtuva tuuli- ja aurinkoenergian lisääntyminen, geoenergian hyödyntäminen, kehittyvä vetytalous, pienten modulaaristen ydinreaktoreiden (SMR) suunnittelu ja mahdollinen käyttöönotto fossiilivapaan kaukolämmön tuottamiseksi, sekä energiasiirtymää vauhdittava kaivostoiminta ovat asioita, joilla on merkittäviä tai vähintäänkin jonkinlaisia ympäristövaikutuksia maaperään ja pohjaveteen.

Tuuli- ja aurinkovoiman keskeiset vaikutukset Suomen maaperään ja pohjavesiin ovat luonteeltaan usein paikallisia ja kohdistuvat etenkin muutoksiin alueellisessa maankäytössä sekä hydrologiassa, erityisesti energiatuotannon rakentamisvaiheessa, mutta myös tuotantovaiheessa. Rakentamisvaiheen maanmuokkauksen lisäksi energiasiirtymän yleisiä ympäristövaikutuksia ovat mm. (i) geologisten elinympäristöjen pirstaloituminen ja estevaikutus rakennusalueilla, (ii) rakennusmateriaalien tuotannon aiheuttama elinympäristöjen häviäminen, (iii) maa-aineksen käyttö ja veden kiertokulkuun liittyvät ilmiöt, sekä (iv) haitallisten aineiden päätyminen maaperään tai kulkeutuminen pohjavesiin rakentamis- tai/ja tuotantovaiheissa (Pasanen ym. 2025).

Energiasiirtymän keskeisiin maaperään ja pohjavesiin kohdistuviin ympäristövaikutuksiin kuuluu myös vihreää siirtymää varten louhittavien ja jalostettavien raaka-aineiden hyödyntäminen. Sen lähtökohtana Suomessa on kansallinen mineraalistrategia ja Ympäristöministeriössä vuonna 2023 käynnistetty säädösvalmisteluhanke, joka tavoittelee kaivostoiminnan pitkäaikaisten

ympäristövaikutusten vähentämistä ja ennaltaehkäisemistä, sekä varmistaa kaivosten ympäristönsuojelusta huolehtimista kaikissa tilanteissa. Eri toimintojen ympäristövaikutusten arviointi on haastavaa, sillä arvioinnissa on huomioitava laajoja kokonaisuuksia ja vaikutusta kohdistuen mm. maaperään ja pohjavesiin pitkällä ja lyhyellä aikavälillä (mm. Pasanen ym. 2025).

Energiasiirtymässä on myös huomioitava, että erityyppisillä geologisilla ympäristöillä on tärkeitä maisemallisia ja suojelullisia arvoja, sekä erityistä merkitystä geodiversiteetin eli kallioperän, maaperän, maanpinnan muotojen ja hydrologian monimuotoisuuden (Toivanen 2024) sekä biodiversiteetin kannalta (Mäkinen ym. 2007; 2011, Rintala ym. 2024). Suomessa harvinaisten ja erityisen suojeltaviksi luokiteltavien geologisten ympäristöjen kirjo on kattava; arvokkaiksi ja geodiversiteetiltään merkittäviksi kohteiksi luokitellaan sekä harju- ja kallioalueita (Rintala ym. 2024) että moreenimuodostumia (Mäkinen ym. 2007), jotka ovat Suomen monipuolisin maaperämuodostumien ryhmä. Suomessa luontoarvoiltaan erityisen arvokkaita ovat luonnontilaiset hiekkarannat sekä rannikkoalueiden dyynit (mm. Hankoniemi, Yyteri, Kalajoki), joilla eliölajien runsaus on varsin huomattava. Kaikkien edellä mainittujen bio-/geodiversiteetiltään ja maisemallisilta arvoiltaan merkittävien alueiden maankäyttö on tänä päivänä vaihtelevaa, ja niiden sijainti tulisi huomioida kaavoissa sekä tarkasti pohtia millaisia aluevarauksia ja osa-aluemerkintöjä niille tehdään.

Luonnonsuojelulailla (9/2023) suojelluista luontotyypeistä (64 §) tai tiukasti suojelluista luontotyypeistä (65 §) valtaosa on sidoksissa alueen maa- tai kallioperään, jotka mahdollistavat harvinaisten tai uhanalaisten luontotyyppien esiintymisen.

Aurinkoenergian tuotantoalueen merkittävimmät ympäristövaikutukset maaperään ja pohjaveteen liittyvät vaaditun pinta-alatarpeen lisäksi rakentamisen eri vaiheisiin, lähinnä maanrakennustöihin sekä huoltoteiden, ojituksen ja kaapelilinjojen rakentamiseen. Rakentaminen voi vaatia kallioperän louhintaa sekä maamassojen kaivamista ja siirtelyä, jotka yhdessä muun maanrakentamisen kanssa aiheuttavat maaperän eroosion kasvua ja kiintoaineksen sekä ravinteiden kulkeutumista. Rakentaminen myös muuttaa maaperän hydrologiaa, kun haittaa aiheuttava vesi johdetaan pois halutulta maa-alueelta ojittamalla, putkittamalla tai puroja ja valtaojia perkaamalla. Pohjavesialueille tehtävät ojitustoimenpiteet saattavat muuttaa alueen valuntaa ja vaikuttaa pohjaveden muodostumiseen sekä pohjaveden pinnan tasoon. Vaikutuksia pohjavesiin aiheutuu todennäköisemmin, mikäli pohjaveden pinta on lähellä maanpintaa tai sitä joudutaan maanrakentamisen yhteydessä keinotekoisesti alentamaan. Maarakentaminen ja merkittävä maaperän muokkaaminen voi aiheuttaa myös pinta- ja pohjaveden samentumista ja ravinteisuuden lisääntymistä tuotantoalueella ja sen läheisyydessä. Rakentamiseen ja ojitukseen liittyvät metsien hakkuut sekä pintamaakerroksen poistaminen vaikuttavat myös pintavaluntaan ja sitä kautta pohjaveteen usein heikentämällä sen laatua.

Tasaisten turve- ja savimaiden osalta maaperän erityiskysymykset pinta-alaltaan suurten aurinkoenergian tuotantoalueiden kohdalla liittyvät happamiin sulfaattimaihin ja ojitettujen turvemaiden kasvihuonekaasutaseiden kehitykseen.

Ojituksen vaikutuksia maaperän hiilensidontaan ja kasvihuonekaasupäästöihin soilla ja turvemetsämailla on tutkittu runsaasti (mm. Kløve ym. 2017; Ojanen ym. 2020; Holmberg ym. 2021). Turvemaiden hiilivarastot ovat merkittävät ja siksi erityisen tärkeitä huomioida muuttavaa maankäyttöä suunniteltaessa (Turunen & Valpola 2020).

Aurinkovoimapuistot ovat yksi uusimmista entisten turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuodoista, mikä näkyy suurena tarpeena aiheeseen liittyvään tutkimuksiin etenkin Suomessa (Räsänen ym. 2023). Entisten turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehdot riippuvat pitkälti alueen vesitaloudesta, eli saadaanko alue vetettyä vai pystytäänkö se pitämään kuivana (Laine-Petäjäkangas ym. 2023). Jatkokäytön valinnalla on vaikutusta etenkin ilmastopäästöihin (Laine-Petäjäkangas ym. 2023). Turpeen hajoamista voidaan vähentää vedenpintaa nostamalla. Nykytilanne aurinkovoiman osalta turvemilla on kuitenkin se, että kohdealue pidetään kuivana, mutta kiinnostusta on noussut myös aurinkovoimapuistoihin märemmillä olosuhteilla (Ikkala ym. 2025). Jos entisillä turvetuotantoalueilla on tunnistettu happamia sulfaattimaita ja/tai mustaliuske-esiintymiä, alueen jatkokäyttömuotoa on suunniteltava huolellisesti kohdekohtaiset ominaisuudet huomioiden ja suosien vaihtoehtoja, joissa happoa tuottavat maakerrokset ovat pysyvästi vedenpinnan alapuolella (Hadzic ym. 2020). Maanmuokkaus ja ojittaminen happamilla sulfaattimilla voivat aiheuttaa maaperän merkittävää happamoitumista ja happaman metallipitoisen pinta- ja pohjavesivalunnan muodostumista sekä maanalaisten rakenteiden korroosiota, mikäli asiaa ei tunnisteta ja huomioida maankäytön suunnittelussa (Autiola ym. 2022, Loukola-Ruskeeniemi ym. 2023).

Aurinkovoiman lähinnä rakennettuun infrastruktuuriin sijoitetusta pientuotannosta ollaan siirtymässä nopeaan tahtiin kohti aurinkoenergian tuotantopuistoja, jonka seurauksena aurinkovoimaloiden pinta-alatarve maastossa kasvaa voimakkaasti kohti teollisen kokoluokan aurinkovoimaloita seuraavan 10 vuoden aikana (Fingrid 2024). Tämä tarkoittaa laajempia keskitettyjä alueita ja rakentamistoimenpiteitä eli suurempaa vaikutusta ympäristöön, mutta tästä kehityksestä ja niiden vaikutuksesta maaperään ja sen hydrologisiin ominaispiirteisiin on vielä vähän tietoa. Dahl (2024) mukaan aurinkovoimalan sijainnin valinta on ratkaisevan tärkeää ympäristöhaittojen minimoimiseksi. Kyseisen tutkimuksen perusteella aurinkovoimarakentamiseen suositellaan heikkolaatuisen metsä-, turve- ja maatalousmaan uudelleenkäyttämistä, jotka liittyvät maaperän ominaispiirteisiin, ja korostetaan hybridimaankäytön mahdollisuuksia tuulivoiman ja maatalouden ohessa.

Tuulivoiman rakentaminen kohdentuu tyypillisesti korkeille mäkisille alueille tai avoimille laakeille rannikkoalueille, ja niiden visuaalinen vaikutus ympäristöön on merkittävä. Suomessa eri vaiheessa olevien hankkeiden yhteispinta-alasta 88 prosenttia sijoittuu metsiin sekä avoimille kankaille ja kalliomaille, seitsemän prosenttia kosteikoille ja avoimille soille ja kolme prosenttia maatalousalueille. Lisäksi kaksi prosenttia hankkeista sijoittuu vesialueille ja alle yksi prosentti jo rakennetuille alueille. Käytännössä tuulivoimaloiden rakentamista suoalueille vältetään (Pasanen ym. 2025).

Tuulivoiman rakentamisen maaperään ja pohjavesiin kohdistuva ympäristövaikutus liittyy nimenomaan rakentamisvaiheen toimintaan, sillä tuulivoimaloiden perustuksissa ja rakentamisessa käytettävät ainesmäärät ja laitteistot ovat kooltaan merkittäviä. Tuulivoimaloiden perustukset, rakennus- ja huoltotieverkosto, ja kaapeliojat usein vaativat merkittävää maan muokkaamista, joka kiihdyttää maaperän eroosiota ja kiintoaineksen ja ravinteiden kulkeutumista. Lisäksi voimaloiden ja niitä ympäröivien nostoalueiden rakentamiseen tarvitaan paljon maa- ja kiviaineksia (kalliomurske, hiekka ja sora), joka lisää ottopaikkoja ja murskaamoja hankkeiden läheisyydessä.

Tuulivoiman rakentamisen yhteydessä tehtävä maanmuokkaus ja irtomaakerroksen poisto muuttavat alueen hydrologiaa, jolla on vaikutuksia pohjaveden muodostumiseen sekä pinta- ja pohjaveden alueelliseen tasoon, virtausreitteihin ja ravinteiden kulkeutumiseen. Myös pintaveden purkautumiseen ja valuntaan usein kohdistuu joitakin muutoksia ojen kaivuun seurauksena. Tuulipuistojen tyypillisen sijoittamisen takia hydrologiset muutokset aiheutuvat enemmän moreenissa esiintyvään pohjaveteen sekä kalliopohjaveteen. Tuulivoiman rakentamisen vaikutukset pohjaveteen ovat usein hetkellisiä, mikäli tuulivoimalaa varten louhitut alueet täytetään uudelleen ja paineellisten pohjavesien sekä orsivesien ilmenemiseen on varauduttu.

Tuulivoiman rakentamisen erityiskysymykset voivat tietyillä alueilla liittyä myös maaperän haitta-aineisiin joko luontaisiin, geologiasta johtuviin kohonneisiin pitoisuuksiin maaperässä tai ihmisen toiminnan seurauksena aiheutuneeseen maaperän pilaantumiseen. Alueet, missä maaperässä on kohonneita pitoisuuksia haitta-aineita, voivat aiheuttaa ympäristö- tai terveysriskin, mikäli tätä ei oteta huomioon asianmukaisesti. Mahdolliset maaperän sisältämät haitta-aineet on huomioitava myös rakentamisen yhteydessä kaivettujen maamassojen jatkokäyttöä suunniteltaessa. Maaperän pilaantumisesta tai luontaisesti kohonneista haitta-ainepitoisuuksista aiheutuvat mahdolliset riskit tulee arvioida ja todetuille riskeille tulee suunnitella tarvittavat riskienhallintatoimenpiteet. Ihmisen toiminnan seurauksena pilaantunut maaperä tulee tarvittaessa kunnostaa, mikäli todettuja riskejä ei muulla tavoin voida hallita.

Rannikkoalueilla maaperäolosuhteet ovat tuulivoiman rakentamisen kannalta usein haastavia paksujen savipeitteiden takia, joka lisää rakentamisen kustannuksia ja perustuksien kokoa. Savialueiden rakentamisen erityiskysymyksenä on aurinkovoiman tavoin alueet, joilla ilmenee ympäristöä happamoittavia happamia sulfaattimaita (Autiola ym. 2022). Tuulivoiman rakentamisen erityiskysymykset liittyvät myös rakentamiseen merialueilla. Tuulivoiman rakentamisvaiheen vaikutukset maa-alueilla ovat helpommin nähtävissä ja ennakoitavissa kuin merialueilla. Merituulivoimahankkeen ympäristövaikutukset vaihtelevat merkittävästi hankkeen sijainnista ja geologisesta ympäristöstä riippuen, ja ne voivat olla sekä negatiivisia että positiivisia (Metsähallitus 2025). Merenpohjan kaivaminen ja muu vesirakentaminen muokkaavat vedenalaista geologiaa aiheuttaen eroosiota, sedimenttien kulkeutumista ja kerrostuminen, joihin liittyy mm. veden hetkellistä tai pidempiaikaista samentumista. Muutoksia merenpohjan rakenteeseen syntyy

merituulivoimaa rakennettaessa myös pakollisista ruoppaus- ja läjitystoimista, jotka niin ikään aiheuttavat muutoksia myös kasvillisuuteen, ravinnepitoisuuteen ja veden sameuteen (ks. myös luku 7.11.5).

Pienydinvoiman rakentamisen merkittävin vaikutus maaperään ja pohjavesiin kohdistuu jäähdytysvesien kierrätykseen sekä mahdollisiin onnettomuustilanteisiin. Hujala ym. (2022) tekemä selvitys tarkastelee, miten Suomen ydinenergiainsäädännössä huomioitaisiin uusien ydinenergiateknologioiden (SMR, small modular reactors) mahdollisuuksia. Selvitys fokusoituu tarkastelemaan niiden geologista rakentamisympäristöä ja rakentamisen aikaisia vaikutuksia myös alueilla, joilla on paksummat maaperäpeitteet (ei ainoastaan peruskallion perustettavia, kuten isot ydinvoimalat). Rakentamisen vaikutukset kohdentuvat isojen ydinvoimaloiden tavoin maaperään ja pohjavesiin, mm. voimaloiden perustukset, jakeluverkosto, jäähdytysveden otto- ja purkukanavat, massanvaihdot, tie- ja pengerrakenteet, suojarakenteet.

Geoenergian lisääminen on myös olennainen osa energiasiirtymää, jolla on sekä rakennus- että tuotantovaiheessa jonkinasteista vaikutusta maaperään ja pohjavesiin (Arola ym. 2021). Geoenergiaa voidaan kerätä sekä maankamaran pinta osista tai vesistöjen pohjalta, tai eri syvyyksille porattujen energiakaivojen avulla. Kaikki keruujärjestelmät muuttavat maaperän ja pohjavesien lämpötilaa lyhyellä ja pitkällä aikavälillä, sekä sisältävät lämmönsiirtonesteiden mahdollisiin vuotoihin liittyvät ympäristöä pilaavat riskitekijät.

Kaiken energiasiirtymään liittyvän rakentamisen ja toiminnan aikana käytetään joitakin määriä polttoaineita ja öljyjä, joten hankkeiden toteuttamiseen liittyy aina myös maaperän ja pohjavesien pilaantumisriski, jos haitallisia kemikaaleja ja öljyjä pääsee maaperään. Riski sisältyy myös tuotantovaiheeseen, sillä esimerkiksi tuulivoimaloiden vaihteistoissa ja laakereissa on satoja litroja öljyä, mikä saattaa erittäin vakavissa häiriötilanteissa (esim. rakenneteellinen virhe tai tuulivoimalan kaatuminen maanjäristyksestä) päästä vuotamaan maaperään ja edelleen kulkeutumaan pohjavesiin. Tällaiset vakavat häiriötilanteet ovat kuitenkin erittäin harvinaisia ja todennäköisyys tapahtumalle erittäin pieni. Vastaavia riskejä liittyy myös laitteistojen huoltotoimenpiteiden yhteydessä tapahtuviin mahdollisiin vuotoihin tai häiriötilanteisiin.

7.9.2 Vesistöt

Suomen vesien määrällinen tila on hyvä ja laadullinenkin tila varsin hyvä. Suomen vesivarojen osalta keskeisiä haasteita ovat hajakuormituksen hallinta sekä vesirakentamisen vaikutusten lieventäminen. Noin puolet suomalaisten kulutuksen aiheuttamasta vesijalanjäljestä kohdistuu kansainvälisen kaupan ja tuonnin välityksellä Suomen rajojen ulkopuolelle, josta 26 prosenttia kohdistuu veden niukkuudesta kärsiville alueille (Valtioneuvosto 2023b). Globaalin vesivastuullisuuden arvioinnin ja kehittämisen näkökulmasta erityisesti yritysten hankinta- ja arvoketjujen vaikutus on siis suuri (Sojamo ym. 2021). Maa- ja metsätalous, energiantuotanto ja eri teollisuuden alat aiheuttavat suurta vedenkulutusta ja merkittäviä vesistövaikutuksia (Valtioneuvosto 2023b).

Joki, puro tai uoma kerää sille sataneen veden valuma-alueelta, joka muotoutuu maastonmuotojen mukaan. Valuma-alueella tapahtuva toiminta kuten maa- ja metsätalous, rakentaminen, liikenne, virkistyskäyttö ja luonnonsuojelu vaikuttavat valuma-alueen maankäyttöön. Yhdessä valuma-alueen ominaisuuksien kanssa maankäyttö vaikuttaa vesimääriin, niiden vaihteluun ja vesien tilaan sekä vesistä riippuvaisiin elinympäristöihin. Valuma-aluesuunnittelun ja kestävän vesienhallinnan osalta voidaan muun muassa hillitä maankäyttösektorin ilmastopäästöjä, edistää pinta- ja pohjavesien hyvän tilan saavuttamista ja ylläpitoa sekä lisätä kalakantojen elinvoimaisuutta, vesiympäristöjen monimuotoisuutta ja muuttuvaan ilmastoon sopeutumista. Uusia ajattelumalleja, kokonaisvaltaisia toimintatapoja ja eri toimijoiden yhteistyötä sekä monitavoitteista valuma-aluesuunnittelua tarvitaan (Marttunen ym. 2024). Valuma-aluesuunnittelun tiekarttaan vuoteen 2030 (Rytönen ym. 2024) on koottu käynnissä olevia toimenpiteitä ja uusia avauksia.

Vesistöjen rehevöitymiseen vaikuttaa erityisesti typpi- ja fosforikuormituksen määrä, jonka lisäksi maan muokkauksesta aiheutuva kiintoaineiden kuormitus aiheuttaa vesistöjen sameutumista, liettymistä ja umpeenkasvua (Finér ym. 2020, Tattari ym. 2015).

Maataloudesta aiheutuvaa vesistöjen kiintoaine- ja ravinnekuormitusta voidaan hallita esimerkiksi lannan käsittelyn ja levityksen hyvillä menetelmillä kuten tasapainoisella käytöllä ja ravinteita sekä orgaanisia aineita kierrättämällä, jolloin typpi ja fosfori saadaan paremmin käyttöön (Hyvönen ym. 2020, Luke 2020). Muita keinoja ovat muun muassa kevennetty maanmuokkaus, suojavyöhykkeiden, kosteikkojen ja laskeutusaltaiden käyttö tai maan rakenteen parantaminen (Puustinen ym. 2019).

Metsätalouden vesistökuormitukseen vaikuttavat hakkuiden määrä ja hakkuutavat, lannoitteiden ja kasvinsuojeluaineiden käyttö ja ojitukset (Peura ym. 2022, Launiainen 2014). Vaikutusten määrää ohjaavat valuma-alueen ja vastaanottavan vesistön ominaisuudet, maankäytön alueellinen laajuus ja toimenpiteiden voimakkuus (Lepistö 2017, Finér ym. 2020) Metsitys voi vähentää peltojen ja käytöstä poistuneiden turvetuotantoalueiden vesistöjen ravinne- ja kiintoainekuormitusta, mutta saattaa toisaalta aiheuttaa luonnon monimuotoisuuden heikentymistä, joten metsitystä on arvioitava kohdekohtaisesti (Lehtonen ym. 2021, Kärkkäinen ym. 2019, Peltonen-Sainio ym. 2018). Vesiensuojelun tavoitteita ja myös maaperän kasvukuntoa voidaan edistää myös mm. monivuotisten ympäristönurmien, luonnonhoitopeltonurmien ja peltojen talviajan kasvipeitteisyyden avulla (Hyvönen ym. 2020). Kosteikkojen perustaminen ja hoito voivat myös vähentää fosforin ja typen sekä eroosion määrää. Vettämisestä kohdekohtainen arviointi on tärkeää mm. ravinteikkaiden peltojen huuhtoumariskin hallinnan kannalta (Ojanen ym. 2020).

Metsistä ja soilta kulkeutuu ravinteita ja orgaanista hiiltä luonnonhuuhtouman lisäksi ojen kunnostuksen, metsän uudistuksen, maan muokkauksen, lannoituksen sekä muiden metsätaloustoimenpiteiden seurauksena (Finér ym. 2010; 2021). Soiden ennallistaminen vaikuttaa Karekselan ym. (2021) mukaan luonnon monimuotoisuuden edistämisen lisäksi myönteisesti myös vesistöihin.

7.10 Yhdyskuntarakenne ja rakennettu ympäristö

Yhdyskuntarakenteella tarkoitetaan asumisen, työpaikkojen, palvelujen ja muiden toimintojen sekä liikenteen ja muun infrastruktuurin sijoittumista ja niiden keskinäisiä suhteita taajamassa, kaupunkiseudulla tai muulla päivittäisen liikkumisen muodostamalla toiminnallisella alueella. Yhdyskuntarakenteen kehityksen perusura suuntautuu kohti tiiviimpää maankäyttöä (Ympäristöministeriö 2024b). Täydennysrakentaminen on yleistynyt ja rakennetun alueen laajeneminen on hidastunut. Toimintojen pitkään jatkunut hajaantuminen yhdyskuntien sisällä, mikä on näkynyt esimerkiksi työmatkojen keskipituuden kasvuna, on tasaantunut.

Yhdyskuntien sisällä kehitys on ollut osin kaksijakoista, kun taajamien keskustat ja niiden reunavyöhykkeet ovat tiivistyneet, mutta reuna-alueilla on jossain määrin jatkunut väljempien autoriippuvaisten alueiden rakentaminen (Ympäristöministeriö 2024b). Yhdyskuntarakenteen kehitys on eronnut toisistaan myös kasvavien ja supistuvien yhdyskuntien välillä. Kasvun keskittyminen on lisännyt yhdyskuntarakenteen eheyttämisen tarvetta kasvavilla alueilla ja toisaalta tuonut rakennuskannan ja infrastruktuurin vajaakäytön haasteita väestöään menettävillä alueilla.

Sekä WEM- että WAM-skenaarioiden voidaan olettaa jatkavan yhdyskuntarakenteen kehitystä aiemman suuntaisesti. Skenaarioiden välillä ei ole eroa uudisrakentamisen volyymissa. Korjausrakentamisen merkitys kasvaa rakennuksiin kohdistuvien energiatehokkuusvaatimusten myötä, ja WAM-skenaariossa tämä korostuu hieman WEM-skenaariota enemmän. Myös rakennusten katoille sijoittuvan aurinkovoiman pientuotannon ajatelleen yleistyvän erityisesti WAM-skenaariossa.

Korjausrakentaminen ja erilaiset energiainvestoinnit painottuvat jossain määrin yhdyskuntarakenteellisesti hyvin sijainteihin ja kasvaville alueille. Supistuvilla alueilla korjausrakentamisen toteuttaminen kohtaa useammin haasteita esimerkiksi rahoituksen järjestämisessä. Rakennusten purkaminen on yleistynyt viime vuosina ja jatkuu molemmissa skenaarioissa melko merkittävänä. Purkaminen kohdistuu supistuville alueille, yhdyskuntarakenteellisesti epäedullisiin sijainteihin ja energiatehottomaan rakennuskantaan sekä purkavan uudisrakentamisen kohteisiin.

Uudet, suuret puhtaan teollisen siirtymän investoinnit ja niihin liittyvät infrastruktuurihankkeet, joita sisältyy erityisesti WAM-skenaarioon, vaikuttavat myös yhdyskuntarakenteeseen. Hankkeet sijoittuvat usein kaupunkiseutujen ja taajamien reuna-alueille, koska tilatarpeet ovat usein suuria ja toiminnoista saattaa aiheutua häiriötä tai riskejä lähiasutukselle. Myös teollisen mittakaavan aurinkovoimahankkeita saattaa sijoittua yhdyskuntien yhteyteen toisin kuin tuulivoimalat. Kasvava osa yhdyskuntien rakennetun maan laajenemisesta liittyykin teollisuuden tai infrastruktuurin kehittämiseen. Tämä saattaa rajata yhdyskunnan toimintojen, kuten virkistyskäytön kehittämistä. Hankkeet voivat myös lisätä hieman yhdyskunnan toimintojen hajautumista, jos uudet teolliset toiminnot kokoavat paljon työmatkaliikennettä ja seudun sisäisiä tavarakuljetuksia ja sijoittuvat kauas yhdyskunnan muista toiminnoista.

WEM- ja erityisesti WAM-skenaariossa on toimenpiteitä, jotka edistävät kestävien kulkutapojen käyttöä ja sitä kautta yhdyskuntarakenteen kestävyyttä. Tilastokeskuksen väestöennusteen (2024) mukaan yli 90 % kaupunkiseutujen väestönkasvusta keskittyy seitsemälle suurimmalle kaupunkiseudulle, jotka ovat maankäytön, asumisen ja liikenteen (MAL) -sopimusten piirissä. Kestävien kulkumuotojen osuus on näillä muita kaupunkiseutuja suurempi ja myös edellytykset kestävän liikkumisen osuuden kasvattamiseen paremmat kuin muualla maassa. MAL-sopimusten avulla pyritään edistämään kävelyn, pyöräliikenteen ja joukkoliikenteen kulkutapaosuuksia. Kunnille myönnetään myös investointiavustuksia kävelyn ja pyöräilyn edistämiseen. Lisäksi esimerkiksi työsuhdepyöräedun kautta on pyritty lisäämään kestävää työmatkaliikennettä.

Kävelyn ja pyöräilyn kulkutapaosuuksien lisääminen on tärkeää siirtymässä vähähiiliseen liikenteeseen. Valtakunnallisen henkilöliikennetutkimuksen (Traficom 2023) perusteella merkittävä osa päivittäisistä henkilöautolla kuljetuista matkoista olisi tehtävissä lihasvoimin jalkaisin tai pyörällä. Kaupunkiseutujen välillä on huomattavia eroja kävelyn ja pyöräilyn kulkutapaosuuksissa. Erityisesti pyöräilyn kulkutapaosuudessa seutujen erot ovat jopa yli kaksinkertaisia verrattaessa esimerkiksi Oulun ja Turun kaupunkiseutuja. Aktiivisten kulkutapojen suosion taustalla tietyillä seuduilla on liikennejärjestelmän pitkäjänteinen kehitystyö, jonka puitteissa on toteutettu laadukkaita ja nopeasti kuljettavia jalankulku- ja pyöräteitä. Näitä esimerkkejä seuraten monilla kaupunkiseuduilla on mahdollisuuksia kasvattaa merkittävästi kävelyn ja pyöräilyn kulkutapaosuuksia. Kävelyn ja pyöräilyn edistämistoimet ovat kokonaisuudessaan melko pieniä suhteessa koko liikennejärjestelmän rahoitukseen, ja lisärahoituksella aktiivisten kulkutapojen infrastruktuuriin olisi mahdollista nopeuttaa aktiivisten kulkutapojen osuuden kasvua.

Koronapandemia vaikutti merkittävästi suomalaisten liikkumiseen. Päivittäin tehtyjen matkojen lukumäärä väheni yli 15 % ja matkojen kilometrimääräkin lähes 15 %. Väheneminen on kohdistunut erityisesti automatkoihin. Vaikka koronan aiheuttamat rajoitukset ovat poistuneet, liikkuminen ei ole palautunut koronaa edeltävälle tasolle. Etätyön yleistyminen on vähentänyt työmatkojen määrää ja vaikka etätyön osuus onkin vähentynyt pandemian jälkeisinä vuosina, osa muutoksesta on pysyvämpää. Uusimpien henkilöliikennetutkimusten perusteella (mm. Traficom 2025c) etätyötä runsaasti tekevät kulkevat autolla vähemmän ja jalkaisin enemmän kuin ne, jotka eivät tee lankaan etätyötä. Matkamäärän väheneminen koronan jälkeen koskee työmatkojen lisäksi myös monia muita matkan tarkoituksia, kuten vierailu-, ostos-, asiointi ja muita vapaa-ajan matkoja. Verkkopalvelujen käyttö ja sähköinen yhteydenpito on mahdollisesti korvannut osan aiemmasta liikkumisesta.

Traficomin uusimman, vuoden 2024 valtakunnallisen liikenne-ennusteen (Traficom 2024d) ja KEITO-skenaarioiden mukaan ajoneuvokanta sähköistyy yhä nopeammin henkilöautoliikenteessä. Keskimääräiset ajokustannukset alenevat sähköautoilun yleistyessä, minkä odotetaan lisäävän ajosuoritteita. Tämä saattaa mahdollisesti hidastaa kestävien kulkutapojen yleistymistä. Toisaalta liikenne-ennusteissa ennakoidaan, että rautateillä henkilöliikenne on palautumassa

koronaa edeltävälle tasolle ja sen arvioidaan kasvavan edelleen ennustejakson alkupuolella, koska väestö keskittyy suurille kaupunkiseuduille ja liikkumiskustannusten lasku suhteessa tulotasojen kasvuun kasvattaa matkojen keskipituutta.

Sähköautoilun yleistymisen vaikutuksia yhdyskuntarakenteessa on vaikea arvioida tarkasti. Sähköautojen kotilatauksen käyttöönotto tapahtuu nopeimmin pientaloalueilla, joilla autoriippuvainen elämäntapa säilyy edelleen yleisenä, jos liikennesuoritteet kasvavat ennusteen mukaan. Vaikka liikenteen päästöt vähenevät sähköistymisen myötä, liikenteen maankäyttövaikutukset säilyvät suurina. Suuri osa palveluista, kuten hypermarketit ja keskustojen ulkopuoliset kaupan alueet nojaavat jatkossakin pääosin autolla tapahtuvaan asiointiin. WAM-skenaariossa sähköautot yleistyvät hieman nopeammin, mutta skenaarioiden välillä ei ole suurta eroa yhdyskuntarakenteen kehityksessä, koska rakenne muuttuu hitaasti ja ajoneuvokanta muuttuu nopeasti kummassakin skenaariossa.

7.11 Keskeisten energiateknologioiden vaikutuksia

Seuraavissa alaluvuissa on esitetty energiasectoriin liittyvien keskeisten, käyttömääriltään kasvavien teknologioiden merkittävimpiä vaikutuksia teknologiakohtaisesti. Keskeisin ero WEM-skenaarioon nähden on pienydinvoiman käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa vuodesta 2035 alkaen sekä hiilidioksidin talteenotto ja varastointi biogeenisistä (BECCS) ja fossiilisista (CCS) lähteistä WAM-skenaariossa. Tuuli- ja aurinkosähkön tuotannossa ei ole WEM:n ja WAM:n välillä merkittävää eroa, mutta niiden voimakas kasvu kummassakin skenaariossa edesauttaa muun muassa vetyinvestointien toteutumista. Geoenergian hyödyntämisen määrä jää WAM-skenaariossa alhaisemmaksi kuin WEM-skenaariossa, mutta sen määrä lisääntyy merkittävästi vuoden 2020 tilanteesta kummassakin skenaariossa. Lisäksi liikenne sähköistyy kummassakin skenaariossa.

Uusiutuvan energian tuotannolla on vaikutuksia muun muassa kasvihuonekaasupäästöihin, luonnonvarojen käyttöön, maankäyttöön, luonnon monimuotoisuuteen (luonnonvaraiset eläin- ja kasvilajit sekä luontotyypit) ja etenkin merituulivoiman osalta myös vedenalaiseen luontoon. Eri teknologioiden, kuten tuuli- ja ydinvoimaloiden, aurinkopaneelien, energia- ja lämpövarastojen, hiilidioksidin talteenotto- ja varastointilaitosten ja näiden tarvitsemien siirtoyhteyksien vaatimat maankäyttö-, materiaali- ja energiamäärät sekä niiden aiheuttamat vaikutukset ihmisiin ja luonnon ekosysteemeihin vaihtelevat muun muassa järjestelmän kokoluokan ja sijainnin mukaan. Merkittävien haittojen välttämiseksi teknologisten järjestelmien sijainnin suunnittelussa tulisi huomioida alueen luontotyypit, eläin- ja kasvilajistot ja muut mahdolliset erityispiirteet merkittävien haittojen välttämiseksi. Samoin tulisi huomioida muun maankäytön aiheuttamat yhteisvaikutukset ja kasautuvat pitkän aikavälin vaikutukset. Paikalliset olosuhteet ja toimintaympäristö kuten nykyiset maankäyttömuodot, luontotyypit sekä (uhanalaiset tai vaarantuneet) kasvi- ja eläinlajit,

maanomistusolot, vaikutukset eri elinkeinojen harjoittamiseen ja työllisyyteen määrittävät suhtautumista uusiutuvan energian hankkeisiin. Esimerkiksi suunnittelun menettelytavat ja vaikutusalueella olevien henkilöiden osallistaminen vaikuttavat toimien hyväksyttävyyteen. Niin sanottuja kriittisiä tekijöitä energiantuotantohankkeiden hyväksyttävyydessä ovat usein etäisyydet lähiasutukseen, lomakiinteistöihin, maisemavaikutukset, melu ja välke, vaikutus kiinteistöjen arvoon, metsien ja muun luontomaiseman pirstoutuminen sekä vaikutukset eläin- ja lintulajistoon, metsästyksen ja virkistykseen. (Peltonen ym. 2024)

Energiantuotannon vaatimien voimalaitosten ja muun infrastruktuurin, esimerkiksi tie- ja sähköinfrastruktuurin, kaapeliverkkojen ja muuntoasemien rakentaminen aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä paitsi työkaluiden, kuljetusten ja työmaiden energiankäytön kautta paikallisesti, myös näihin energiajärjestelmiin ja -teknologioihin tarvittavien raaka-aineiden ja laitteistojen tuotantomaissa, usein Suomen rajojen ulkopuolella.

Eri energiantuotantomuotojen vaikutusten arviointimenetelmät vaihtelevat ja yksittäisissä arvioinneissa tehdyt rajaukset ja oletukset ovat usein tapauskohtaisia, jolloin arviointien välinen vertailu on haastavaa. Laajemmissa vertailututkimuksissa, esimerkiksi Brucker ym. (2014), on arvioitu elinkaarisiksi kasvihuonekaasupäästöiksi tuulivoimalle 7–56 g CO₂-ekv./kWh, aurinkopaneeleille 18–180 g CO₂-ekv./kWh ja ydinvoimalle 4–110 g CO₂-ekv./kWh. Yhdistyneiden kansakuntien (YK) ympäristöohjelman (UNEP 2016) arvio vähähiilisten energiateknologioiden ilmastovaikutuksista vaihteli keskimäärin 10 ja 80 g CO₂-ekv./kWh välillä verrattuna fossiilisten polttoaineiden käyttöön perustuvien teknologioiden päästötasoon 400–1000 g CO₂-ekv./kWh. YK:n Euroopan talouskomissio UNECE (2021) puolestaan arvioi päästöjen tasoksi maatuulivoimalle 8–16 g CO₂-ekv./kWh, merituulivoimalle 12–23 g CO₂-ekv./kWh, ydinvoimalle 5–6 g CO₂-ekv./kWh, vesivoimalle 6–147 g CO₂-ekv./kWh (vaihtelu 360 MW laitosten osalta 6–11 g CO₂-ekv./kWh), keskitetylle aurinkovoimalle (concentrated solar power) 27–122 g CO₂-ekv./kWh ja aurinkosähkölle (photovoltaics) 8–83 g CO₂-ekv./kWh²⁸.

7.11.1 Pienydinvoima

Keskeinen haaste taakanjakosektorin kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisessä on kaukolämmöntuotannon hiilijalanjäljen pienentäminen. Yhtenä teknologisenä ratkaisuna tähän on tunnistettu pienydinvoimalaitosten (SMR) käyttö kaukolämmön tuotannossa (esim. Lindroos ym. 2019). Pienydinvoimalaitokset ovat selvästi pienempiä kooltaan kuin ns. perinteiset, sähköntuotantoon käytetyt ydinvoimalat. Koska pienydinvoimalat tuottavat lämpöä ja kunnallisten kaukolämpöverkkojen hiilijalanjäljen leikkaaminen on yksi

²⁸ Ohutkalvoteknologiat ovat silikonipohjaisia ratkaisuja vähäpäästöisempiä (UNECE 2021).

tulevaisuuden energiahaasteista, selvitetään monissa kunnissa mahdollisuuksia pienydinreaktorien käyttöön etenkin kaukolämmön tuotannossa.

Keväällä 2024 perustettu Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n spin-off-yritys Steady Energy kehittää LDR-50 -pienydinreaktoria, joka on tarkoitettu kaukolämmöntuotantoon sekä matalan lämpötilan teollisuussovelluksiin (Sokka ym. 2024). Pienydinvoimasta on laadittu aiesopimuksia Helsingin ja Kuopion kanssa ja ensimmäistä testilaitosta ollaan rakentamassa Helsinkiin. Koelaitos on kooltaan Steady Energyn tuottamien LDR-50 voimalaitosten kokoinen, mutta se ei sisällä ydinpolttoainetta. Sen sijaan pilottivoimalaan asennetaan sähkövastus, jolla koelaitoksen on tarkoitus tuottaa lämpöä Helsingin kaukolämpöverkkoon noin kuuden megawatin teholla. (Steady Energy 2025)

Pienydinvoiman ympäristövaikutuksia on tutkittu vasta vähän. Sokka ym. (2024) tekemässä laskennassa pienydinvoiman tuotannon ympäristövaikutuksista lähtötietoina käytettiin LDR-50-reaktorin ydinpolttoainekierrolle ominaisia lukuja. Koska reaktorin suunnittelutyö oli vielä kesken, lämmityslaitosten rakentamisen, käytön ja käytöstä poiston osalta laskuissa jouduttiin turvautumaan suuruusluokka-arvioihin, jotka perustuvat perinteiseen ydinvoimalaitostekniikkaan. Tähän laskennassa sovellettiin UNECE ym. (2021) tekemää laskentaa, jossa tarkasteltu teknologia on painevesireaktori (PWR; pressurized water reactor). Niiden osuus on yli 60 % kaikista maailman ydinreaktoreista. Tulosten perusteella LDR-50-reaktorilla tuotetun lämmön elinkaarinen kasvihuonekaasupäästö olisi noin 2,4 g CO₂-ekv./kWh. Luku on siis selvästi pienempi kuin muiden lämmöntuotantoteknologioiden, ml. lämpöpumppujen, joiden laskettiin vaihtelevan välillä 6–199 g CO₂-ekv./kWh riippuen tarkastellun Euroopan maan keskimääräisistä sähköntuotannon päästöistä (Sokka ym. 2024). Työssä pienydinvoiman muita elinkaarisia ympäristövaikutuksia vertailtiin lisäksi kivihieilellä, öljyllä, maakaasulla, biokaasulla ja biomassalla tuotetun kaukolämmön elinkaariin ympäristövaikutuksiin. Myös muissa tarkastelluissa ympäristövaikutusluokissa pienydinvoiman vaikutukset olivat selvästi vertailuteknologioita pienemmät, lukuun ottamatta ionisoivaa säteilyä, jossa ne olivat kevytpolttoöljyä pienemmät, mutta muita verrattuja energialähteitä suuremmat, sekä fossiilisten luonnonvarojen kulutusta, jossa ne ylittivät maakaasun ja biomassan vaikutukset. Ympäristövaikutusten osalta pienydinvoima vaikuttaa siis erittäin potentiaaliselta ratkaisulta suhteessa muihin lämmitysteknologioihin, mutta tutkimusta tarvitaan lisää.

Koska pienydinvoimaratkaisuja kaukolämmöntuotannossa sijoitettaisiin kaupunkeihin tai lähelle niitä, voi sosiaalinen hyväksyttävyys nousta keskeiseksi kysymykseksi päätettäessä teknologian käyttöönotosta. Laitosten sijoittuminen ja syntyvän jätteen muodostuminen, sekä kokemus laitosten turvallisuudesta ovat kysymyksiä, jotka voivat nousta olennaisiksi päätöksiä tehtäessä. Aihetta on tutkittu käytännössä vasta vähän, mutta Vainio ja Kojo (2025) ovat nostaneet esiin keskeisiä asioita, joita jo suunnitteluvaiheessa tulisi tarkastella. Heidän mukaansa ydinturvallisuus, ylisukupolvinen vastuu ydinjätteistä, ydinlaitoksia koskevan päätöksenteon demokraattisuus, taloudellinen tasa-arvo ja globaalien tuotantoketjujen oikeudenmukaisuuden toteutuminen ovat teemoja, jotka

noussevat keskeisiksi ja jotka päätöksiä tehdessä tulisi huomioida. Vainio ja Kojo (2025) korostavat myös, että oikeudenmukaisuuden toteutumisen kannalta olennaista olisi nimetä vastuiden ja vastuunkantajat jo nyt, kun laitossuunnitelmat ovat vasta vireillä.

7.11.2 Tekniset hiilinielut

Teknisillä (tai teknologisilla) hiilinieluilla tarkoitetaan eri teknologioihin pohjautuvia keinoja, joilla poistetaan hiilidioksidia ilmakehästä pysyvästi. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen joko suoraan ilmakehästä (DAC; direct air capture) tai fossiilisten raaka-aineiden tai biomassan polton yhteydessä. Hiilidioksidi voidaan talteenoton jälkeen joko varastoida (CCS; carbon capture and storage) pysyvästi esimerkiksi merenalaisiin geologisiin muodostumiin tai mineraaleihin tai uudelleenkäyttää (CCU; carbon capture and utilisation) eli hyödyntää erilaisten tuotteiden kuten biopolttoaineiden valmistuksessa.

Biomassasta tai suoraan ilmakehästä talteen otettava ja pysyvästi varastoitu hiilidioksidi tuottaa hiilinielun, mikäli hiilidioksidin talteenotto, kuljetus ja varastointi eivät synnytä enempää hiilidioksidipäästöjä kuin hiilidioksidia saadaan varastoitua (Kujanpää ym. 2023). Lisäksi, mikäli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi johtaa biomassan käytön lisääntymiseen, tulee huomioida myös lisääntyneen biomassan tuottamisen ja korjuun vaikutus maaekosysteemien hiilinieluun (Soimakallio ym. 2022, Kujanpää ym. 2023).

Hiilidioksidin talteenotossa ja varastoinnissa hiilidioksidi erotetaan teollisuuden päästöistä, tiivistetään nestemäiseksi, siirretään varastointipaikoille putkistojen, säiliöalusten tai muiden kuljetusvälineiden avulla ja lopulta varastoidaan. Suomessa CCS-prosessin kehittäminen toteuttaa Pariisin ilmastopöytäkirjan ja EU:n vuonna 2024 laatiman hiilenhallintastrategian tavoitteita ja edistää hallitusohjelman mukaisia hiilensidonnallisten tavoitteita.

Suomessa sedimenttikiviä on kolmella alueella: Perämeren alueella Hailuodon ja Muhoksen muodostumissa sekä Selkämeren ja Ahvenanmeren sedimenttikivimuodostumissa. Näiden sedimenttikivimuodostumien CCS-soveltuvuus on kuitenkin todettu heikoksi (Solismaa 2009). Tarkastelujen mukaan mainitut muodostumat ovat pääsääntöisesti liian matalia, niiden huokoisuus on huono ja niissä ei ole selkeää tai helposti kartoitettavissa olevaa sulkukerrosta, joka pidättäisi syvälle injektoidun hiilidioksidin muodostuman alemmissa kerroksissa. Tähän pohjaten vuonna 2012 astui voimaan laki, joka kieltää hiilidioksidin varastoinnin Suomessa geologisesti ja vesipatsaaseen. Kielto ei kuitenkaan koske hiilidioksidin geologista varastointia, jos varastoitava määrä on alle 100 000 tonnia ja varastoinnin tarkoitus on uusien tuotteiden ja menetelmien tutkimus, kehittäminen ja kokeilu. (Finlex 416/2012). Tutkimus, kehittäminen ja kokeilu on sallittu, että voidaan ottaa huomioon kehittyvät teknologiset ratkaisut. Välivarastointi kalliovarastossa voisi olla mahdollista, mutta sen kustannustehokkuus tulisi arvioida huolella ja se vaatisi teknisiä ratkaisuja tuekseen (Aatos ym. 2011).

Suomessa keskipitkän aikavälin potentiaalisena vaihtoehtona teknisten nielujen toteuttamiseksi on arvioitu biomassapohjaisen polttoprosessin yhteydessä tapahtuvaa hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (BECCS; bioenergy with carbon capture and storage). Suomen metsäteollisuus, lämpövoimalaitokset, muut polttolaitokset ja jätteenpoltto tuottavat vuosittain noin 28 miljoonaa tonnia bioperäistä hiilidioksidia. Näistä yhdeksästä suurimmasta päästölähteestä on arvioitu voitavan ottaa talteen lähes 16 Mt bioperäistä hiilidioksidia vuosittain, yksikkökustannuksen (ml. talteenotto, paineistus, kuljetus ja varastointi) ollessa noin 120–240 euroa per hiilidioksiditonni (Kujanpää ym. 2023).

Toteutuakseen BECCS-hankkeet edellyttäisivät merkittäviä taloudellisia kannustimia kuten teknisten nielujen liittämistä EU:n päästökauppamekanismiin tai tarjouskilpailua. Suomen ilmastopaneeli (2025) on kannustimien heikon nykytilan vuoksi alentanut arviotaan Suomen BECCS-potentiaalista viidestä miljoonasta kolmeen miljoonaan hiilidioksiditonniin. Tämänkin arvion toteutuminen vaatisi hankkeiden suunnittelun nopeaa käynnistämistä, sillä esimerkiksi Stockholm Exergin maaliskuussa 2025 investointipäätökseen edennyt BECCS-laitoksen suunnittelu aloitettiin jo vuonna 2019 (Beccs Stockholm 2025).

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi ilmakehästä (DACCS) on todennäköisesti kallista vielä 2035 mennessä, mikä rajoittaa sen käyttöönottoa. Euroopan ilmastopaneelin arvion mukaan hinta olisi 500–1000 euroa per hiilidioksiditonni (ESABCC 2025). KEITO-skenaariolaskelmissa DACCS:n on oletettu olevan liian kallista, eikä sen oletettu kaupallistuvan lainkaan WEM- ja WAM-skenaariotarkasteluissa.

7.11.3 Hiilidioksidin varastoinnin teknologiat

Hiilidioksidin geologinen varastoiminen on jaettavissa kolmeen vaihtoehtoon: varastoiminen sedimenttimuodostumaan yleensä öljy-, kaasu- tai suolavesiakkiferiilavuuksia hyödyntäen, varastoiminen hiilimuodostumaan tai pumppaaminen syvälle meren pohjaan (IPCC 2005). Mereen sijoittaminen on kielletty sekä Suomen laissa (Finlex 416/2012) että Koillis-Atlantin meriympäristön suojelua koskevan yleissopimuksen (OSPAR-yleissopimus) muutoksessa, joka astui voimaan 2007. Koska Suomessa ei ole hiilimuodostumia, on geologista loppusijoittamista tarkasteltu sedimenttimuodostumiin.

Geologisessa varastoinnissa nesteeksi paineistettu hiilidioksidi pumpataan syvälle maan pinnan tai merenpohjan alla sijaitseviin geologisiin muodostumiin. Varastointiin sopivan muodostuman tulee omata hyvä huokoisuus ja läpäisevyys ja sen on sijaittava vähintään 800 m syvyydessä, jolloin ympäröivä paine ja lämpötila pitävät hiilidioksidin nestemäisessä tai superkriittisessä tilassa. Näissä syvyyksissä hiilidioksidin tiheys on noin 50–80 % veden tiheydestä. Muodostuman päällä on oltava pidättävä sulkukerros, ettei hiilidioksidi nouse ylöspäin pois tilavuudesta, johon se on injektoitu. Sulkukerros on tyypillisesti hienorakeista sedimenttikiveä (savikivi tai hienoaineskivi).

CCS:n soveltaminen Suomessa vaatii hiilidioksidin varastoinnin osalta poikkeavia teknisiä ratkaisuja, joista mineraalikarbonointi on yksi vaihtoehto. Kun

hiilidioksidi reagoi magnesium- tai kalsiumperäisten silikaattien kanssa sopivissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa on lopputuotteina karbonaattia, vettä ja kvartsia sekä lämpöä. Luonnossa tämä prosessi on hidas ja havaittavissa kallioiden rapautumisena, mutta prosessia on mahdollista nopeuttaa ja tehostaa teknisesti. Kalsiumin ja magnesiumin karbonointiprosessin lopputuotteet ovat termodynaamisesti stabiileja, vaarattomia ympäristölle ja veteen heikosti liukenevia ja hiilidioksidi pysyisi karbonaateissa arvioiden mukaan miljoonia vuosia. (Teir ym. 2006.)

Karbonointiprosessia kehitetään edelleen. Lupaavimmissa prosesseissa mineraalit on louhittava, murskattava ja jauhattava ennen karbonointia reaktorissa ja tulokset ovat lupaavia. Prosessin soveltaminen suuressa mittakaavassa on kuitenkin edelleen kehitteillä ja vaatii tutkimus- ja kehitystoimenpiteitä. Yksi tutkimuslinjoista on tarkastella teollisuuden sivutuotteiden ja jätteiden, kuten sementtijätteen sekä rauta- ja teräskuonan karbonointia, mihin liittyen on kehitetty esimerkiksi Slag2PCC-prosessia (esim. Mattila ym. 2014).

Kaivannaisteollisuuden sivukivilouheena ja rikastushiekkana on paljon potentiaalisesti karbonointiin soveltuvaa ainesta, jonka käytettävyys sekä käytettävyyden vaatimat prosessit hiilen sidontaan olisi selvitettävä. Mikä tahansa kivilaji ei prosessiin käy, mutta tutkimusten perusteella sopivia olisivat varsinkin ultraemäksiset kivilajit, joista louhitaan teollisuusmineraaleja ja metalleja (esim. talkki, kromi, nikkeli) (Teir ym. 2006). Kivilajeista varsinkin serpentiiniitti on ollut tutkimuksen kohteena (Lavikko 2017, Aatos ym. 2006) ja kiinnostus sen käyttöä kohtaan on vahvistumassa. Esimerkiksi Business Finlandin rahoittama, Nesteen Veturi-ekosysteemiin kuuluva PILCCU-hanke on selvittänyt laajamittaista hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön (CCU) mahdollistamista Suomessa. Hankkeessa käytettävät teknologiat pohjautuvat Åbo Akademiassa kehitettyyn magnesiumin uutto- ja rikastusprosessiin (ns. ÅA-prosessi) ja hiilidioksidin mineralisointiin, jossa hiilidioksidin kanssa reagoiva magnesium muodostaa pysyviä yhdisteitä (esim. Zevenhoven ym. 2023).

Mineraalikarbonoinnin kehittyessä se voidaan lisätä IPCC:n kasvihuonekaasujen sitomisen laskentamenetelmiin mukaan. Toistaiseksi virallinen laskentamenetelmä on vain geologiselle varastoinnille, jota tämän luvun alkuosassa käsiteltiin (Kujanpää ym. 2023).

7.11.4 Vety

Tulevaisuuden puhtaassa energiajärjestelmässä vety voi olla keskeinen teknologia tasaamassa vaihtelevaa sähköntuotantoa ja siten mahdollistamassa aurinko- ja tuulivoiman merkittävän lisäämisen. Vedyn tuotannon merkittävä laajentaminen vaatii uusiutuvaa sähköä sekä laajoja investointeja jakeluverkkoon ja putkistoihin. Siten vedyntuotanto saattaakin etenkin tulevana vuosikymmeninä olla keskeinen ajuri tuuli- ja aurinkovoiman käytön kasvussa. Tällöin myös näiden, seuraavissa luvuissa kuvattujen teknologioiden kestävyysvaikutukset liittyvät läheisesti vedyntuotantoon. Tässä luvussa keskitytään nimenomaan vedyntuotannon vaikutuksiin.

Vedyntuotantoon on useita teknologioita ja niiden perusteella vedyntuotantoa on jaettu eri kategorioihin. Vähäpäästöisinä tai ns. päästöttöminä teknologioina pidetään vihreää vetyä, jossa vety tuotetaan elektrolyysillä, jonka energialähteenä on käytetty uusiutuvaa energiaa sekä violetti vety, jossa käytetty sähkö tuotetaan ydinvoimalla. Elektrolyysi sinänsä on vanha teknologia, jossa vesi jaetaan vedyksi ja hapeksi sähkövirran avulla. Toistaiseksi sitä kuitenkin käytetään vedyntuotannossa vasta vähän erityisesti korkeampien kustannusten takia (esim. Järvinen 2025). Ympäristövaikutusten kannalta elektrolyysissä erityisen olennaista on prosessissa käytetty sähkö.

Kiinnostus etenkin vihreään vetyyn on viime vuosina kasvanut vauhdilla ja ensimmäinen teollisen mittaluokan laitos on jo aloittanut tuotannon (P2X 2025). Vedin on arvioitu olevan helpommin varastoitavaa kuin sähkö, ja suunniteltujen siirtoverkkojen avulla sen siirtämisen arvioidaan olevan mahdollista tulevaisuudessa. Gasgrid Finland Oy:n ja Nordion Energi AB:lla on käynnissä yhteishanke, joka pyrkii rakentamaan Ruotsista Suomeen ulottuvan vetyinfrastruktuurin ja siten avaamaan avoimen vetymarkkinan Perämeren alueelle vuoteen 2030 mennessä (Gasgrid 2025).

Vedyntuotannon elinkaarisista ympäristövaikutuksista on viime vuosina julkaistu paljon tutkimuksia (esim. Arrigoni ym. 2024; Osman ym. 2024; Maciel ym. 2023). Elektrolyysillä, jossa vedyntuotannossa on käytetty tuuli- tai aurinkovoimalla tuotettua sähköä, hiilijalanjälki on ollut alle 5 kg CO₂-ekv./kg H₂ (Henriksen ym. 2023; Goita ym. 2025). Tutkimukseen Goita ym. (2025) arvioivat myös mahdollisen vetyhävikin ilmastovaikutuksia tuotannon ja siirron aikana. Niiden suuruudeksi tutkimuksessa arvioitiin 0,3 kg CO₂-ekv./kg H₂. Myös elinkaariset happamoitumis- ja rehevöitymisvaikutukset ovat uusiutuvaa sähköntuotantoa käyttävässä elektrolyysissä olleet matalia (Chen ym. 2025).

7.11.5 Tuulivoima

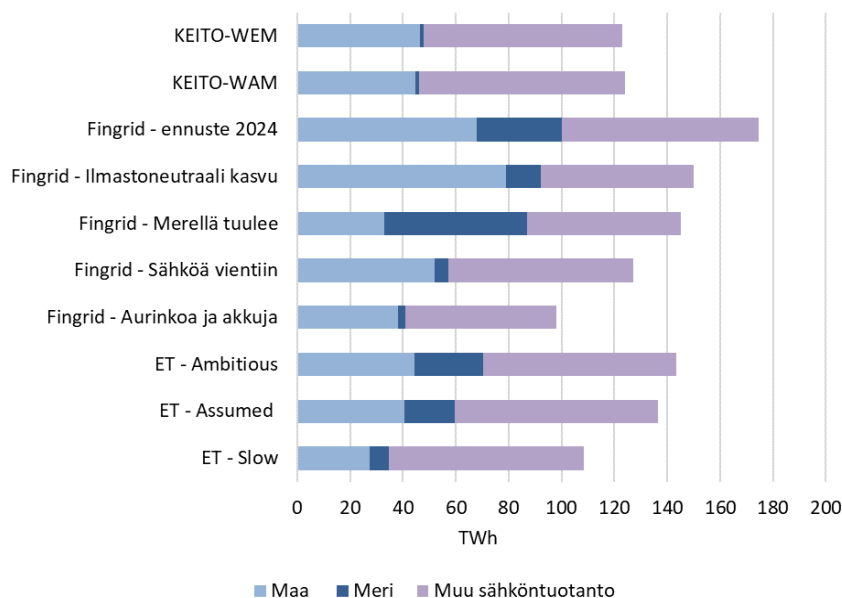
Tuulivoiman tuotanto on kasvanut Suomessa voimakkaasti 2000-luvulla. Vuoden 2024 lopussa asennettua ja käytössä olevaa kapasiteettia oli yhteensä 8 362 megawattia, josta merituulivoimaa 44 megawattia (Suomen uusiutuvat 2024a). Vuonna 2019 tuulivoiman osuus oli noin yhdeksän prosenttia Suomen sähköntuotannosta, vuonna 2024 jo 25 prosenttia (19,9 TWh; Energiateollisuus 2024). Tuulivoimakapasiteetin kasvuun vaikutti vuonna 2011 voimaan tullut uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuki. Tämä niin sanottu syöttötariffijärjestelmä sulkeutui uusien tuulivoimaloiden osalta 1.11.2017, minkä jälkeen uudet tuulivoimainvestoinnit ovat tapahtuneet markkinaehtoisesti. Vanhat voimalat saavat tuotantotukea 12 vuoden ajan rakentamisesta.

Tuulivoiman merkitys kasvaa entisestään. Fingridin sähköverkon suunnitteluskenaario (Fingrid 2024a) mukaan tuulisähkön tuotantomäärät nousevat ydinvoiman ohi jo ennen vuotta 2030 ja tuulivoimasta tulee tärkein sähköntuotantomuoto. Tässä ennusteessa tuulivoimalla tuotetaan sähköä 60 TWh (46 % koko tuotannosta) vuonna 2030 ja 101 TWh (58 %) vuonna 2035. Energiateollisuuden päivitetystä ilmastotiekartasta (Berté ym. 2023) arvio

tuulisähkön tuotannosta vuonna 2035 puolestaan vaihtelee Slow-skenaarion 35 TWh:sta (32 %) Ambitious-skenaarion 70 TWh:iin (49 %). WEM- ja WAM-skenaarioissa tuulivoiman tuotanto on vajaa 50 TWh (n. 38 %) vuonna 2035 ja vajaa 60 TWh (41 %) vuonna 2050.

Merituulivoiman osuus on kaikissa arvioissa melko pieni vuoteen 2030 asti, mutta kasvaa tämän jälkeen voimakkaasti, kun se arvioiden mukaan nousee maatuulivoimaa kilpailukykyisemmäksi ja hyväksyttävämmäksi tuotantomuodoksi. TIMES-mallinnuksissa lähes kaikki uusi tuulivoimakapasiteetti rakentuu kuitenkin maalle. Merituulivoiman osalta KEITO-WEM-skenaario sisältää nykyisten voimaloiden lisäksi ainoastaan positiivisen tukipäätöksen saaneen Porin Tahkoluotoon rakennettavan pienen 30 MW:n uuden merituulipuiston, eikä merituulivoimaa synny juurikaan lisää myöskään WAM-skenaariossa.

Kuvaan 49 on koottu eri skenaarioiden arvioita maa- ja merituulivoiman tuotannosta sekä koko kotimaisen sähköntuotannon määrästä vuonna 2035.



Kuva 49. Maa- ja merituulivoima sekä muu sähköntuotanto eri skenaarioissa vuonna 2035. Fingridin nimetyt skenaariot ovat Verkkovisiosta vuodelta 2021 (Fingrid 2021) ja Energiatieteiden (ET) skenaariot päivitetystä ilmastotiekartasta (Berté ym. 2023).

Kesäkuuhun 2024 mennessä hankesuunnitelmia uusista maatuulivoima-hankkeista oli julkaistu valtavasti: maalle 73 000 MW:n ja merelle 69 900 MW:n edestä (Suomen uusiutuvat 2024a). Kaavoitus oli aloitettu 88 maatuulivoima-hankkeen (yht. 16 700 MW) ja kolmen merituulivoimahankkeen osalta (yht. 4 800 MW). Suomen ympäristökeskuksen arvion mukaan Suomessa on potentiaalista

tuulivoimakapasiteettia maalla 34 000–48 000 MW ja merellä 25 000–30 000 MW (Nurmio & Pakarinen 2024). Tämä on noin kolminkertainen määrä verrattuna voimassa olevien maakuntakaavojen mahdollistamaan kapasiteettiin. Optimistisen skenaarion mukaan potentiaalista toteutuisi 33 000 MW maalle vuoteen 2030 mennessä ja 8 000 MW merelle vuoteen 2040 mennessä. Toteuma-arvio on melko hyvin linjassa Fingridin ennusteen kanssa.

Tuulivoiman laajamittaisen lisäämisen keskeinen haaste on sähköverkkorajoitteet. Sääriippuvaisen sähkön tuotanto edellyttää suuria investointeja siirtokapasiteettiin, sähköjärjestelmän kulutuksen, tuotannon ja varastoinnin uusia teknologiaratkaisuja sekä sektori-integraation kehittämistä. Harvinaisten maametallien tarve voi muodostua ongelmaksi, ja globaali kilpailu niiden käytöstä ja tuotannosta voi lisätä haitallisia ympäristö- ja ihmisoikeusvaikutuksia (Church & Crawford 2018). Lisäksi huomionarvoista on tuulivoiman rakentamiseen liittyvät maisemavaikutukset, vaikutukset paikallisyhteisöihin ja luontoarvoihin sekä yleinen hyväksyttävyys.

Talousvaikutukset

Tuulivoima tarjoaa merkittäviä taloudellisia mahdollisuuksia Suomelle. Hankkeet parantavat energiaomavaraisuutta, kontribuovat ilmastotavoitteisiin ja edistävät puhdasta siirtymää, lisäävät työllisyyttä ja tuovat investointeja ja talouden positiivisia kerrannaisvaikutuksia sekä paikallisesti että kansallisesti. Tuulivoiman kasvu tuo myös markkinoille uusia toimijoita ja lisää kilpailua, mikä hajauttaa energiantuotantoa, tekee sähkömarkkinasta vähemmän keskittyneen ja voi vaikuttaa sähkön hintakehitykseen pitkällä aikavälillä laskevasti (Hansson ym. 2020).

Tuulivoimahanke vaatii tuotantopanoksia useilta eri toimialoilta ja synnyttää monenlaista taloudellista aktiviteettia. Voimalainvestoinnin kustannuksista itse tuulivoimala kattaa suurimman osan. Maalle rakennettaessa voimalan osuus on noin 70 prosenttia, maarakentaminen ja perustukset noin 13 prosenttia ja sähkötyöt seitsemän prosenttia (Karhinen ym. 2023). Lisäksi tarvitaan muun muassa kuljetus- ja nosturipalveluita. Hankkeen tarvitsemat esiselvitykset, hallinnointi ja käytön aikana huoltopalvelut vaativat niin ikään resursseja.

Elinkeinoelämän Keskusliiton (EK) hankeikkunan tietojen perusteella merituulivoimainvestointien arvo on keskimäärin 2,35 milj. €/MW (EK 2024b). Maatuulivoiman rakentaminen maksaa vastaavasti 1,31 milj. €/MW, eli merituulivoiman kustannukset ovat n. 1,8-kertaiset maatuulivoimaan verrattuna. Kustannusten suhteuttaminen odotettuun sähköntuotantoon kääntää asetelman kuitenkin toisin päin. Shields;n ym. (2021) mukaan turbiinien ja voimalaitosten koon kasvu, esimerkiksi siirtyminen 20 megawatin turbiineihin ja 2 500 megawatin voimalaitoskokoonpanoihin, voi alentaa energiantuotannon tasakustannusta (LCOE) jopa 23 % verrattuna pienempiin ja vanhempiin kokoonpanoihin. Kustannussäästö johtuu esimerkiksi asennuskustannusten, sähköjärjestelmien optimoinnin sekä kunnossapidon tehostamisesta. Lisäksi suuremmat hankkeet hyötyvät mittakaavaeduista, mikä vähentää yksikkökustannuksia huomattavasti.

Merituulivoimahankkeessa voimaloiden osuus kokonaisinvestoinnista on pienempi kuin maalla, ja vastaavasti kaikki muut kustannuserät ovat suurempia (Gaia 2023). Pelkästään hankekehitys maksaa arviolta 100–200 miljoonaa ja kestää 8–10 vuotta (HE 147/2024 vp). Meriolosuhteissa voimalan perustukset vaativat kalliita erikoisratkaisuja ja kuljetukset, offshore-nosturit, asennusaluksat, merenalaiset kaapelit ja sähköverkkoon liittäminen ovat kalliimpia kuin maalla. Myös laajamittainen YVA-menettely ja tarvittavat esiselvitykset merenpohjan tutkimuksineen vaikuttavat kustannuksiin.

Tuulivoimahankkeen vaikutukset kansan- ja aluetalouteen riippuvat ensisijaisesti hankkeen volyymista, mutta myös alueen talousrakenteesta ja paikallista tuotantoketjuista. Karhinen ym. (2023) tutkivat panos-tuotusmallilla 228 megawatin investoinnin vaikutuksia Pohjois-Pohjanmaan talouteen ja työllisyyteen. 297 miljoonan investointikuluista noin 28 % kohdistui maakuntaan eli noin 83 miljoonaa euroa. Kerrannaisvaikutukset huomioiden kokonaistuotantovaikutus maakunnassa oli noin 130 miljoonaa euroa ja arvonlisäys noin 53 miljoonaa euroa. Kokonaisvaikutus maakunnan työllisyyteen suorat ja välilliset vaikutukset huomioiden oli 864 työllistä, eli runsaat 10 henkeä maakuntaan investoitua miljoonaa euroa ja 4 henkeä asennettua megawattia kohden. Vaikutukset on arvioitu voimahankkeen suunnittelusta käyttöönottoon, eivätkä sisällä tuulipuiston käyttöä ja huoltotoimintaa elinkaaren aikana.

Gaian selvityksessä (2023) merituulivoiman vaikutus olisi vuoteen 2045 mennessä 4,4–7,5 henkilötyövuotta per megawatti riippuen hankkeiden toteutus- ja kotimaisuusasteesta. Verovaikutus palkka-, yhteisö- ja kiinteistöverot mukaan lukien olisi 30 vuoden elinkaaren aikana 2–5 miljardia euroa. Vuoden 2024 (Gaia 2024) selvityksessä tutkittiin EK:n dataikkunan tuulivoimahankkeita, investointiarvoltaan yhteensä 207 mrd. €. Selvityksen mukaan hankkeiden vaikutus BKT:hen olisi 30 vuoden elinkaaren aikana n. 175 mrd. € mikäli kaikki hankkeet toteutuisivat. Oletuksena oli kuitenkin, että investointeja toteutuu noin 26 miljardin edestä, jolloin BKT-vaikutus olisi 23 mrd, verokertymä 5 mrd ja työllisyysvaikutus 124 000 htv.

Kunnille erityisesti voimaloiden kiinteistöverot voivat olla merkittävä tulonlähde. Tuulivoimalat ovat kiinteistöverolaissa ja arvostamislaisissa tarkoitettuja rakennelmia, joiden verotusarvo perustuu niiden jälleenhankinta-arvoon. Kunnanvaltuusto voi kiinteistöverolain nojalla määrätä erikseen veroprosentin, jota sovelletaan voimalaitokseen. Veroprosentiksi voidaan määrätä enintään 3,10 (HE 169/2020 vp). Merituulivoimaloilla on korkeampi kiinteistöverorasitus korkeampien rakentamiskustannusten takia. Merituulivoimaloiden saattamiseksi kiinteistöverotuksessa samaan asemaan maatuulivoimaloiden kanssa merituulivoimaloiden osalta jälleenhankinta-arvon tulisi olla 35 prosenttia rakentamiskustannuksista, kun maatuulivoimaloilla samoin vastaava osuus on 75 prosenttia. (HE 147/2024 vp)

Tuulivoiman vaikutukset kohdistuvat myös elinkeinoihin. Tuulipuistot voivat pirstoa peltolohkoja tai vaikuttaa kulkureitteihin. Porotalouteen ja luontomatkailuun voi kohdistua suuria vaikutuksia (Peltonen ym. 2024). Myös merituulivoimala-hankkeilla voi olla joitakin negatiivisia vaikutuksia taloudelle ja elinkeinon

harjoittamiselle, lähinnä kalastukselle ja merenkululle. Vaikutuksia voidaan ehkäistä ja vähentää hankkeiden huolellisella sijoittelulla (Vihavainen ym. 2024).

Sosiaaliset vaikutukset

Tuulivoima on yleisesti varsin hyväksyttyä, mutta tilanteen arvioidaan heikkenevän lähivuosina tuulivoiman rakentamisen jatkuessa vilkkaana. Vaikutukset konkretisoituvat paikallisella tasolla ja monet hankkeet ovat kiistanalaisia. Tuulivoiman rakentamista ei juuri koordinoita politiikan kautta, vaan kehitys on hanketoimijoiden, kuntien, maanomistajien ja alueviranomaisten vastuulla jokseenkin sattumanvaraisesti. Hankkeiden määrä ja vauhti voi tuntua hallitsemattomalta. (Peltonen ym. 2024)

Paikallista hyväksyttävyyttä määrittävät tuulivoiman hyödyt ja haitat ja niiden jakautuminen, suunnittelun menettelytapojen reiluus sekä paikallisen toimintaympäristön erityispiirteet, kuten maanomistusolot, muut elinkeinot ja maankäyttömuodot. Kriittisiä tekijöitä ovat etäisyydet lähiasutukseen, lomakiinteistöihin, maisemavaikutukset, melu ja välke, vaikutus kiinteistöjen arvoon, metsien ja muun luontomaiseman pirstoutuminen sekä vaikutukset eläin- ja lintulajistoon, metsästyksen ja virkistykseen. (Peltonen ym. 2024)

Tuulivoimaa rakennetaan jo melko kauas kantaverkosta, jolloin liityntäjohto voi kulkea kymmenien, joskus satojenkin maanomistajien maiden halki yleensä 26–42 metriä leveällä johtokäytävällä, jolta mahdollinen puusto on kaadettava. Johtokäytävää varten lunastettavien alueiden maanomistajien kokemus eriarvoisuudesta syntyy vertailusta itse tuulivoima-alueen maanomistajien asemaan ja heille maksettavaan maanvuokraan. (Peltonen ym. 2024)

Keskeinen epäoikeudenmukaisuutta kokeva ryhmä on tuulivoima-alueiden vaikutuspiirissä asuvat ihmiset, joiden maisemaan, elinkeinoihin, ympäristöön ja luonnon virkistyskäyttöön toteutuva tuulivoimahanke voi vaikuttaa haitallisesti, mutta jotka eivät saa taloudellista hyötyä koska eivät omista maata tuulivoima-alueella. Tuulivoimama-alueen rakentaminen tarkoittaa väistämättä maisemanmuutosta ja muuttaa sen vaikutuspiirissä asuvien ihmisten kokemusta paikasta.

Monesti asukkaat myös kokevat, että kunta painottaa tuulivoimaratkaisuihinsa liikaa pelkkiä taloushyötyjä kaikkien kuntalaisten ja yleisen edun sijaan. Kokemus voi olla vahvempi, jos tuulivoimasta ei juuri synny paikallisia työllisyysvaikutuksia, tuotettu sähkö menee muualle ja tuulivoimayhtiö on ulkomainen. Taloudellisten hyötyjen epätasainen jakautuminen ja huoli ympäristö- ja luontoarvoista heikentävät hyväksyttävyyttä. Hyödyt, mukaan lukien tuulisähköä hyödyntävä jalostava teollisuus, jakautuvat myös alueellisesti epätasaisesti tuulivoimarakentamisen keskittyessä länteen ja luoteeseen. (Peltonen ym. 2024)

Maanomistajien aktiivisuus ja keskinäinen yhteistyö tuulivoimahankkeiden alkuvaiheissa, tuulivoimayhtiöiden varhainen ja pitkäjänteinen vuorovaikutus paikallisten sidosryhmien kanssa, paikallisia hyötyjä kasvattavat toimet, maanomistajien reilu kohtelu sekä vaikutusten hallinta ja tuulivoimatoimijoiden

lähiseudulle maksama kompensatoraha sen sijaan parantavat hyväksyttävyyttä. (Peltonen ym. 2024)

Merituulivoiman sosiaalisten vaikutusten voidaan arvioida olevan pienemmät kuin maatuulivoimalla, ja ne ilmenevät lähinnä talousvaikutusten kautta. Merituulivoiman hyväksyttävyys on yleisesti parempi kuin maatuulivoiman, koska vaikutukset paikallisyhteisöihin ovat pienemmät. Merituulivoimalat sijaitsevat kauempana asutuksesta, minkä ansiosta ne aiheuttavat vähemmän visuaalisia- ja meluhaittoja kuin maatuulivoimalat. Tämä vähentää asukkaiden vastustusta verrattuna maatuulivoimaan, jossa voimalat ovat usein lähellä asutusta ja näkyvät selvästi maisemassa (Ladenburg ym. 2020).

Vaikutukset päästöihin ja luonnonvarojen käyttöön

Tuulivoimalla on vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin, luonnonvarojen käyttöön, maankäyttöön, linnustoon, eliöstöön sekä merituulivoimalla myös vedenalaiseen luontoon ja merenpohjaan. Merkittävin positiivinen vaikutus on kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen, kun fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan korvata tuulivoimalla. Samalla vähenevät ilmansaastepäästöt ja veden käyttö.

Tuulivoiman maankäyttötarve riippuu useista tekijöistä, jotka liittyvät itse tuulivoimaloihin ja niiden sijoitusympäristöön. Voimaloiden koko ja määrä, suojaetäisyydet esimerkiksi asutukseen ja luonnonsuojelualueisiin nähden sekä tarvittavan infrastruktuurin, kuten tarvittavien tieyhteyksien, sähkölinjojen ja huoltoalueiden määrä vaikuttavat maankäyttöön. Vaden & Majava (2023) esittivät tuulivoiman suoriksi maankäyttövaikutuksiksi 1–10 km²/TWh, minkä voidaan olettaa kattavan hyvin erilaisia kohteita. WEM- ja WAM-skenaarioissa tuulivoiman tuotannon on arvioitu kasvavan noin 60 TWh:iin vuoteen 2050 mennessä. Tästä aiheutuvan lisärakentamisen maankäyttötarve on siten vuoteen 2020 verrattuna karkeasti noin 5–50 kha. Metsäkato aiheuttaa Suomessa keskimäärin 250 t CO₂/ha suuruisen päästön, joten tällä oletuksella lisärakentamisesta aiheutuvan suoran maankäyttövaikutuksen päästöt ovat noin 1–12 Mt CO₂, mikä jaettuna tasan vuosille 2021–2050 tarkoittaa noin 0,04–0,4 Mt CO₂/a. Vertailuksi metsäkato aiheutti Suomessa 2010-luvulla keskimäärin noin 3,5 Mt CO₂-suuruiset päästöt vuodessa (Tilastokeskus 2025a).

Merelle rakennettavien tuulivoimaloiden elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt ovat useimpien tutkimusten mukaan hieman suuremmat kuin maatuulivoimalla, mikä johtuu merenalaisesta infrastruktuurista sekä rakentamisen ja huoltojen monimutkaisuudesta. Taulukkoon 17 on koottu arvioita meri- ja maatuulivoiman elinkaaripäästöistä.

Taulukko 17. Maa- ja merituulivoiman elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt suhteessa tuotettuun energiaan eri tutkimuksissa. Yksikkö g CO₂-ekv./kWh.

Tutkimus	Maatuulivoima	Merituulivoima
Schlömer ym. 2014 (IPCC)	15	17
Bonou ym. 2016	7	11
Chipindula 2018	5–7	6–9
Wang ym. 2019	11	18
Brussa ym. 2023		31
Atilgan & Azapagic 2016	7	

Tuulivoimalan tärkeimpiä rakennusmateriaaleja ovat teräs ja rauta, lasikuitu ja polymeerit, alumiini ja kupari. Materiaalintarve on asennettua megawattia kohden noin 110 tonnia terästä, 13 tonnia lasikuitua ja polymeerejä, 1,5 tonnia alumiinia ja 0,8 tonnia kuparia (Vestas 2024). Harvinaisista maametalleista tuuliturbiineihin käytetään Alves Dias ym. (2020) mukaan neodyymiä (51–180 kg/MW; praseodyymiä (4–35 kg/MW), dysprosiumia (6–17 kg/MW ja terbiumia (1–7 kg/MW). Muita tarvittavia raaka-aineita ovat teräsrakenteisiin tarvittavat kromi, mangaani, molybdeeni, niobium, nikkeli sekä sinkki, silikoni ja boori (Carrara ym. 2023).

Yksittäisen tuulivoimalan materiaalien tarpeen lisäksi tulee ottaa huomioon tuulipuistojen sisäinen sähkökaapelointi sekä siirtolinjat, mikä lisää erityisesti kuparin tarvetta. Kokonaista tuulipuistoa koskeneessa tutkimuksessa (Gao ym. 2019) kuparin käyttö oli 20 tonnia/MW. Lisäksi perustusten betonin tarpeeksi laskettiin lähes 400 t/MW. Merituulipuistojen osalta raaka-aineiden tarve on erityisesti betonin, teräksen ja kuparin osalta noin 1,5–2-kertainen (ks. esim. Wiesen ym. 2013, Berndt 2015, Farina & Anctil 2022).

Harvinaiset maametallit (rare earth elements, REE), kuten neodyymi, praseodyymi, dysprosium ja terbium, esiintyvät malmioissa pieninä määrinä, ja niiden louhiminen on tuulivoimaloissa käytettävistä raaka-aineista kaikista materiaali-intensiivisintä (Farina & Anctil 2022). Lisäksi metallien erottelu on kemiallisesti monimutkaista ja tarvitsee usein happoja, liuottimia ja muita kemikaaleja, jotka voivat saastuttaa maaperää ja vesistöjä, jos ympäristön suojelutoimet ovat puutteelliset. Kiina dominoi harvinaisten maametallien tuotantoa, mikä aiheuttaa näiden raaka-aineiden ja niistä valmistettujen komponenttien saatavuudelle erityisen suuren häiriöriskin.

Tuulivoimaloiden käyttöikä on noin 25–30 vuotta, minkä jälkeen voimalat puretaan. Perustukset jätetään usein paikalleen ja alue maisemoidaan. Tarvittaessa perustukset voidaan osittain purkaa räjäyttämällä ja murskaamalla

syntynyt teräsbetoni. Tuulivoimaloista voidaan kierrättää tällä hetkellä noin 80–95 % materiaaleista, metallikomponenttien kierrätysasteet ovat nykyisin lähes sata prosenttia (Pasanen ym. 2025). Harvinaisten maametallien ja kestopagneettien kierrätys on kuitenkin vasta alkutekijöissään.

Maatuulivoiman luontovaikutukset

Maatuulivoimaloiden aiheuttamat vaikutukset ympäristöön, ml. luonnonvaraiset kasvi- ja eläinlajit ja luontotyytit, vaihtelevat voimaloiden sijainnin ja koon mukaan. Maisema-, melu- ja välkevaikutuksien vuoksi tuulivoimaloita sijoitetaan usein etäälle asutuksesta, mikä lisää siirtoyhteyksien tarvetta ja voi häiritä erityisesti laajoja elinpiirejä tarvitsevia lajeja kuten suuria petolintuja ja nisäkäspetoja. Tuulivoimalat voivat vaikuttaa elinympäristöjen soveltuvuuteen ja eläinten käyttäytymiseen, esimerkiksi elinalueen valintaan ja sieltä siirtymiseen sekä eläinten kuolleisuuteen (Schöll & Nopp-Mayr 2021).

Voimala-alueet voivat pirstoa ja vähentää elinympäristöjä. Varsinaisten voimaloiden ja siirtolinjojen lisäksi maa-alaa tarvitaan myös voimaloiden välittömässä läheisyydessä olevilla nostoalueilla sekä rakennus- ja huoltotöihin tarvittavalle tieverkostolle. Yksittäistä tuulivoimalaa ja sen huoltoteitä varten tarvitaan maapinta-alaa noin kaksi hehtaaria (Soimakallio ym. 2021). Lisäksi sähkönsiirto tuotantoalueelta kantaverkkoon vie metsäalaa noin 5 ha/km. Tuulivoiman aiheuttama metsäkadon on kuitenkin oletettu olevan toistaiseksi verrattain pientä suhteessa siihen, kuinka suuri osa Suomen metsistä on metsätalouskäytössä ja millainen sen vaikutus on (Pasanen ym. 2025). Metsälajien suojelutason kehittymisen kannalta metsäkatoa olennaisempi riski on se, että tuulivoiman lisärakentaminen yhdessä muun maankäytön kanssa heikentää ekologista kytkeytyvyyttä (Vuori ym. julkaisematon). Tuulivoiman rakentamisen vaikutuksia maaperään ja pohjaveteen tarkastellaan luvussa 7.9.1.

Linnustovaikutusten osalta keskeisiä ovat päämuuttoreitit, alueella lepäilevät ja ruokailevat linnut sekä varsinaiset pesimäalueet. Hekkien alueiden tunnistaminen on kuitenkin hankekehityksessä haastavaa, koska linnut liikkuvat paljon ja käyttävät eri elinympäristöjä eri vuodenaikoina (Vihavainen ym. 2024). Vaikutukset voidaan jakaa törmäysvaikutuksiin, häiriö- ja estevaikutuksiin sekä elinympäristömuutosten aiheuttamiin vaikutuksiin. Vaikutukset linnustoon ovat myös voimakkaasti paikka- ja lajikohtaisia. Lintujen lisäksi myös ilmassa roottorien vaikutuspiirissä lentävät lepakot ovat mahdollinen huomioitava eläinryhmä. Tahkoluodon meritulipuiston lintututka-aineisto osoittaa, että pääsääntöisesti linnut kiertävät voimalat eivätkä tuulivoimalat ole vaikuttaneet negatiivisesti alueen linnustoon. Linnustovaikutukset ovat olleet YVA-menettelyssä arvioitua pienemmät. (Suomen uusiutuvat 2024b)

Suomessa tuulivoimarakentamisen haittavaikutuksia on arvioitu kohdistuvan muun muassa maakotkiin, susiin, kurkiin, pöllöihin, metsäkanalintuihin, metsäpeuroihin, poroihin ja tiettyihin lepakkolajeihin (Tolvanen ym. 2023; 2025, Gaultier ym. 2023, Balotari-Chiebao ym. 2021). Eläinten reagointi tuulivoimaloihin voi vaihdella saman lajinkin sisällä positiivisen, negatiivisen ja tavanomaisen

käytöksen jatkumisen välillä. Elinympäristöjen vähenemisestä ja pirstoutumisesta yhtenäis- ja ristikkäisvaikutuksineen on kuitenkin vielä vähän tietoa saatavilla. Tuulivoiman eläimiin kohdistuvien haittavaikutusten riskiä voidaan vähentää välttämällä voimaloiden sijoittamista herkkien eläinlajien ydinreviireille ja muuttoreiteille sekä rakentamista pesimäkauden aikana.

Merituulivoiman luontovaikutukset

Merituulivoiman ympäristövaikutukset voidaan jaotella vedenpinnan yläpuolisiin, alapuolisiin (vesipatsas ja merenpohja) ja maa-alueille sähkönsiirron vuoksi kohdistuviin vaikutuksiin sekä toisaalta rakentamisen ja käytön aikaisiin vaikutuksiin. Tutkimustietoa vaikutuksista on vain rajoitetusti saatavilla ja kansainvälistä tutkimusta ei voida monin osin suoraan soveltaa erilaisten olosuhteiden vuoksi. Itämeri on erityinen merialue sekä rakentamisen ja suunnittelun kannalta että luonnonolosuhteiltaan. Veden suolapitoisuus vähenee asteittain Tanskan salmien lähes Atlantin pitoisuuksista kohti Perämereä, jossa harvat merelliset lajit selviävät. Suolapitoisuus vaihtelee voimakkaasti myös paikallisesti suolapulssien esiintymisen mukaan.

Merituulivoiman sijoituspaikalla on keskeinen rooli ympäristövaikutusten merkittävyyden kannalta. Vedenalainen meriluonto on monimuotoisimmillaan matalilla alueilla missä valoa suodattuu veteen runsaammin. Suurikokoiset merituulivoimalat vaativat tyypillisesti hieman suuremman vesisyvyyden, jossa myös lajiston monimuotoisuus Itämeren olosuhteissa on pienempää. Suojelualueet rajoittavat rakentamista, ja myös niille kauempaa ulottuvat vaikutukset on otettava huomioon. Natura-alueiden osalta tehdään tarvittaessa erillinen Natura-arviointi. (Suomen uusiutuvat 2024b)

Vaikutusten kalastoon ja vedenalaiseen luontoon arvioidaan olevan merkittävimpiä voimaloiden rakentamisvaiheessa. Vaikutukset liittyvät pohjan muokkaamiseen, siitä aiheutuvaan veden samentumiseen ja rakennusmeluun. Merituulivoimaloiden perustusten rakentamisen ja merikaapeleiden asentamisen vaikutuksia voidaan verrata ruoppaushankkeisiin, joissa kiintoaineen leviäminen voi ulottua satojen metrien päähän ruopattavasta alueesta. Rakennustyöt sekä massojen läjittäminen hävittävät merenpohjan eliöstöä, habitaattia ja suojapaikkoja rakennusalueilla, joilla puolestaan on vaikutusta pohjaeliöstöä syövään kalastoon. Pohjaeläimistön arvioidaan kuitenkin palautuvan alueille verrattain nopeasti. (Vihavainen ym. 2024)

Rakennustöistä aiheutuva veden samentuminen vaikuttaa kaikkiin lajeihin, jotka ovat valosta riippuvaisia. Kiintoaineiden lisääntyminen vedessä vähentää valon määrää vaikeuttaen makrolevien ja vesikasvien yhteyttämistä. Veden samentuminen voi aiheuttaa kalojen väliaikaista karkottumista alueelta. Kalojen kutu voi epäonnistua, jos rakennustöitä suoritetaan kalojen kutuaikaan. Samentumisen lisäksi merituulivoimapuistojen rakentamisella voi olla vaikutusta myös haitta-aineiden vapautumiseen, jotka ovat aiemmin olleet stabiileja merenpohjassa. (Vihavainen ym. 2024)

Melun vaikutukset kalastoon ja vedenalaiseen luontoon arvioidaan olevan suhteellisen rajattuja, ja ne riippuvat merkittävästi käytetystä perustamismenetelmästä. Rakennustöiden aikainen melu voi aiheuttaa kaloille fysiologista stressiä, kuolleisuutta, fyysisiä vammoja tai vaikuttaa niiden käyttäytymiseen. Melun arvellaan olevan merkittävin häiriö merinisäkkäille, jotka käyttävät kuuloa ja ääniä monipuolisesti saalistamiseen, suunnistamiseen ja kommunikointiin. Haittavaikutukset voivat olla äänilähteen hokuttava tai karkottava vaikutus, äänien sekoittuminen, merinisäkkäiden omien äänien peittyminen tai pysyvät kuulovauriot (Vihavainen ym. 2024). Merinisäkselajisto on Itämerellä melko vähäluokista. Suomen merialueella asustaa käytännössä vain kolme nisäkselajia: harmaahylje, itämerennorppa ja erittäin harvinainen pyöriäinen.

Tuulivoimalan käytönaikainen melu ylittää tyypillisesti vedenalaisen taustamelun, ja kuuluvuussäteen kaloille on arvioitu ulottuvan kilometrien etäisyydelle tuulivoimalasta. Käyntiäänen ei ole kuitenkaan osoitettu häiritsevän kaloja kuin melutasoilla, jotka vallitsevat aivan tuulivoimalan välittömässä läheisyydessä muutaman metrin säteellä. Eri kalalajien välillä on kuitenkin suurta vaihtelua kuulon tarkkuudessa. Mitä suurempi tuulivoimala on, sitä matalataajuisempaa ja laajemmalle levittyvää melua se tuottaa. (Vihavainen ym. 2024)

Merituulivoimarakenteet muuttavat paikallisesti elinympäristöä. Muokattava pinta-ala on voimalakohtaisesti kuitenkin pääsääntöisesti verrattain pieni suhteessa hankealueiden kokoon, joten pohjaeläinvaikutuksen näkyminen kalojen ravinnonhankinnassa voi jäädä vähäiseksi. Pohja-eläimistön palautuminen hankkeissa tehtävän ruoppauksen tai pohjanmuokkauksen jälkeen voi kestää arviolta 1–3 vuotta. Vesikasvillisuuden palautuminen puolestaan voi kestää tätä kauemmin. (Vihavainen ym. 2024)

Parhaimmillaan merituulivoimaloiden perustukset voivat luovat edellytyksiä eliöstön monimuotoisuuden kasvamiselle toimimalla keinotekoisina riuttoina luoden uusia elinympäristöjä eläin- ja kasvilajeille, mutta Itämerellä tästä hyötyviä lajeja on vähän. Lisäksi voimalat voivat vaikuttaa vaelluskalojen käyttämiin reitteihin.

7.11.6 Aurinkovoima

Suomessa oli vuoden 2024 lopussa verkkoon kytkettyä aurinkovoimaa sekä suuret aurinkovoimalat että kotitalouksien ja yritysten pientuotanto mukaan lukien yhteensä 1 109 MW (Fingrid 2025). Teollisen kokoluokan voimaloita (yli 1 MW) oli 26 kappaletta, kapasiteetiltaan yhteensä 123 MW (Suomen uusiutuvat 2025a). Rakenteilla olevien isojen aurinkovoimalahankkeiden kapasiteetti on yli 500 MW ja hankkeita on suunnitteilla peräti 23 300 MW:n edestä Suomen uusiutuvat 2025b). Aurinkosähköä tuotettiin vuonna 2024 ennakkotietojen mukaan 1 155 GWh, noin 1,5 % Suomen sähköntuotannosta (Tilastokeskus 2025b).

KEITO-WEM-skenaariossa aurinkosähkökapasiteetti on 4 400 MW vuonna 2030 ja sähköntuotanto noin 6 TWh (vajaa 6 % sähköntuotannosta). Vuonna 2040

aurinkosähköä tuotetaan yli 9 TWh (7 %) ja vuonna 2050 noin 12 TWh (8 %). WAM-skenaariossa katoille sijoitettavaa aurinkovoimaa tulee hieman enemmän ja teollisen mittakaavan aurinkovoimaa vastaavasti hiukan vähemmän kuin WEM:ssä.

Aurinkovoiman rakentamisen ympäristökäyttövaikutukset riippuvat siitä, kuinka paljon aurinkovoimaloista sijoitetaan luonnonympäristöön ja toisaalta rakennettuun ympäristöön. Lisäksi maankäyttötarpeeseen vaikuttaa infrastruktuurin rakentamistarve, kuten maatuulivoimankin kohdalla. Vaden & Majava (2022) arvioivat, että aurinkovoiman suora maankäyttövaikutus on 6–16 km²/TWh. WEM- ja WAM-skenaarioissa aurinkovoimalla tuotetaan noin 12 TWh sähköä vuonna 2050. Mikäli noin kolmannes aurinkovoimasta sijoittuu metsiin, kuten PEIKKO-hankkeessa (Koljonen ym. 2024) oletettiin, aiheutuisi tästä noin 2–19 kha suora maankäyttövaikutus. Käyttämällä Suomen keskimääräisen metsäkadon päästöä (250 t CO₂/ha), saadaan suoran maankäyttövaikutuksen päästöiksi 1–4 Mt CO₂, mikä tasan vuosille 2021–2050 jaettuna on noin 0–0,2 Mt CO₂/a.

Suurista aurinkovoimalahankkeista (yli 150 MW) noin puolet on suunnitteilla ainakin osittain suonpohjille ja niiden välittömään läheisyyteen. PM Orpon hallitusohjelman mukaisesti aurinkovoimantuotantoa ohjataan rakennettuun ympäristöön, turvetuotannosta vapautuneille alueille ja joutomaille. Peltojen ja metsämaan merkittävää käyttöä aurinkovoimaan pyritään välttämään (Laasasenaho ym. 2024).

Suomen Ilmastopaneelin (Lång ym. 2022) mukaan kansallisen hiilineutraalisuuden saavuttaminen vuonna 2035 vaatii turvemaiden käytön muuttamista nykyisestä, mutta potentiaalia vähentää turvemaiden kasvihuonekaasupäästöjä on toistaiseksi hyödynnetty vain vähän. Potentiaali saadaan käyttöön muuttamalla maankäyttöä, tuotannon arvoketjuja ja kulutusta nykyistä kestävämmälle pohjalle. Samalla tämä kehitys antaa mahdollisuuden parantaa esimerkiksi luonnon monimuotoisuutta, tulvasuojelua tai hyödykkeiden tuotannon kestävyyttä. Turvetuotantoalueilla aurinkovoimalat voivat mahdollistaa useita samanaikaisia maankäyttömuotoja, kuten turvemaiden vettämistä ja kosteikkoviljelyä (Laasasenaho ym. 2024).

Aurinkovoiman tuotanto on pinta-alaintensiivistä ja alueita pirstaloivaa toimintaa. Aurinkovoiman vaikutuksista ympäristöön on tieteellistä näyttöä vain rajallisesti, ja tieteelliset tutkimukset ovat keskittyneet lähinnä Yhdysvaltoihin, Isoon Britanniaan sekä Ranskaan (mm. Lambert ym. 2021, Lafitte ym. 2023). Nämä tutkimukset käsittelevät erityisesti alueiden kasvillisuutta ja biodiversiteettiä, mutta sisältävät myös viittauksia maaperän ominaispiirteisiin, kuten kosteuden ja lämpötilan muutoksiin. Suomessa aurinkovoiman tuotanto on ollut pistemäistä, usein yksittäisten kotitalouksien tarpeisiin suunnattua, ja sen vaikutus maaperään on vähäistä, mutta yhä enenevässä määrin myös laajamittaisempaa ja keskittyen tasaisille alueille, kuten savimaille (vanhat pellot) tai vanhoille turvetuotantoalueille. Hallitusohjelman linjauksesta huolimatta uusia teollisen mittakaavan aurinkovoimalahankkeita on vireillä myös metsäisille alueille. Aurinkovoiman rakentamisen vaikutuksia maaperään ja pohjaveteen tarkastellaan luvussa 7.9.1.

Aurinkovoiman luontovaikutuksia on tarkasteltu erityisesti maatalousympäristön pölyttäjien ja kasvien osalta (Vuori ym. julkaisematon). Vaikutuksia on havaittu kohdistuvan ainakin kasveihin, pölyttäjiin, lintuihin, lepakoihin ja maaperäeliöihin. Vaikutusmekanismeja ovat elinympäristöjen katoaminen, sirpaloituminen ja muuttuminen. Suomessa suurten aurinkovoimahankkeiden on todettu heikentävän paikallisesti ekologista kytkeytyneisyyttä. Eläimet saattavat karttaa voimala-alueita ja törmätä rakenteisiin. Maaperäeliöiden mikroilmasto voi muuttua ja aiheuttaa häiriöitä. Toisaalta aurinkovoimalan alue voi myös luoda elinympäristöjä esimerkiksi pölyttäjille. Maataloustuotannon yhdistämisellä aurinkovoimatuotantoon voi olla mahdollista saavuttaa samanaikaisesti talous- ja luontohyötyjä (Barron-Gafford ym. 2019).

7.11.7 Geoenergia

Geoenergian ympäristövaikutukset eroavat merkittävästi aurinko-, tuuli- tai turvevoiman vaikutuksista. Pääasiallinen syy on se, että geoenergian vaikutukset kohdistuvat maanpinnan alapuolisiin osiin. Tämän vuoksi erityisesti pientalojen geoenergiajärjestelmien vaikutukset maankäyttöön ovat minimaaliset verrattuna muihin uusiutuvan energian muotoihin. Lisäksi geoenergiaratkaisut rakennetaan pääasiassa palvelemaan rakennuksia, joten ne sijoitetaan alueelle, jonka maankäyttö on jo varattu asuin- tai teolliseen toimintaan. Suuret geoenergiaratkaisut perustuvat useiden kymmenien energiakaivojen eli energiakaivokentän toimintaan. Tällöin maankäytön tarve on suurempi, koska kaivojen välimatka toisistaan on normaalisti 10–20 metriä. Esimerkiksi 10–20 energiakaivon kenttä vaatii noin 1000–3000 m² pinta-alan. Energiakaivokenttiä tehdään usein tulevien rakennusten alle, tie- tms. alueelle, jolloin ne eivät itsessään tuo lisätarvetta maankäytölle.

Kallioperään sijoitettavien energiakaivojen ympäristövaikutukset voidaan periaatteessa jakaa kahteen erilliseen osaan: asennus- ja käyttövaiheeseen. Asennusvaiheessa vaikutuksia tulee lähinnä kaivojen porauksista ja sen suorista vaikutuksista. Merkittäviä ympäristöriskejä ei ole todettu vaan suurimmat ympäristöriskit liittyvät kaivon porauksen aikaisiin polttonestevuotoihin (Arola ym. 2021). Käyttövaiheessa vaikutuksena on maanpinnan alaisten osien lämpötilan muutos ja mahdolliset lyhytaikaiset muutokset kallioperän pohjavedenpainekenttään. Maanpinnan alaisen lämpötilamuutoksen vaikutuksia esimerkiksi mikrobitoimintaan ei ole tutkittu laajasti. Lämpötilan muutoksen palautuminen lähelle, esim. noin 0,5 °C päähän lähtölämpötilasta, kestää likimain saman pituisen ajan, kuin energiakaivon käyttö (Kallio ym. 2019, Rybach 2007).

Geoenergiaa voidaan hyödyntää myös suoraan maaperän pohjavedestä. Tällöin puhutaan pohjavesienergiasta tai ns. avoimen kierron (open loop) järjestelmistä. Avoimen kierron järjestelmillä on vaikutuksia pohjaveden lämpötilaan ja mahdollisesti myös pohjaveden virtauskenttään. Pohjaveden virtauskenttä ei periaatteessa kokonaisuutena muutu, koska järjestelmässä pumpataan maasta pohjavesi, hyödynnetään siitä energia ja sen jälkeen

palautetaan pohjavesi takaisin akviferiin. Käytännössä imeytysmäärä ei kuitenkaan hyvin usein ole täysin sama kuin pumppausmäärä.

Pohjavesienergian hyödyntämisen vaikutuksia pohjaveden mikrobeille on myös tutkittu vähän. Tiedossa on suurten lämpötilojen (yli 60°C) haitallisia vaikutuksia joidenkin alkuaineiden, kuten arseenin ja vanadiinin liukoisuuteen (Bonte ym. 2013). Suomen pohjavedet ovat luonnostaan mikrobiköyhiä ja energiasysteemien alhaiset toimintalämpötilat laskevat kemiallista kokonaisriskiä. Alle 30 °C lämpötilamuutosten ei ole arvioitu vaikuttavan ekosysteemin tilaan pohjavesienergiakohteissa (Brielmann ym. 2009)

Uudet maanalaiset lämpövarastot voivat muodostaa maankäytön vaikutuksia lähinnä louhinnan ja muun rakentamistyön aikana. Varaston toiminnan aikana vaikutuksen maanpinnalle rajoittuvat lähinnä huoltotiehen. Esimerkiksi Helsingissä ja Vaasassa on otettu entisiä maanalaisia öljysäiliötä lämpövarastoiksi. Öljy on tällöin korvattu vedellä. Näissä kohteissa rakennusaikaisia maankäytön vaikutuksia ei ole, koska varastoa varten ei ole tarvinnut louhia tai tehdä muita infratöitä.

7.11.8 Liikenteen sähköistyminen

Kotimaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2023 hieman yli 9,4 Mt CO₂-ekv., joka on noin 23 % Suomen kokonaispäästöistä (ilman LULUCF-sektoria) (Tilastokeskus 2025a). Taakanjakosektorilla liikenne on suurin päästölähde. Sen osuus taakanjakosektorin päästöistä oli vuonna 2023 noin 36 %. Suomi on sitoutunut vähentämään EU:n taakanjakoasetuksen mukaisesti päästöjään 50 prosenttia vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Liikenteen päästöt ovat vähentyneet toistaiseksi noin neljänneksellä lähinnä autojen energiatehokkuuden paranemisen ja biopolttoaineiden käytön lisääntymisen ansiosta.

Valtaosa, lähes 95 %, kotimaan liikenteen päästöistä syntyy tieliikenteestä. Tieliikenteen päästöistä taas henkilöautot vastaavat noin 52 prosentista ja kuorma-autot 35 prosentista. Loput jakautuvat linja-autoille, pakettiautoille ja pieni osuus moottoripyörille ja mopoille (Ympäristöministeriö 2024). Tieliikenteellä on siten keskeinen rooli taakanjakosektorin velvoitteiden ja Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Vuoteen 2030 asti biopolttoaineiden käyttö todennäköisesti kasvaa jakeluvelvoitelain mukaisesti, mutta samaan aikaan liikenteen voimakas sähköistymiskehitys vähentää päästöjä merkittävästi.

Liikenteen sähköistyminen käynnistyi Euroopassa vuonna 2009, jolloin henkilöautonvalmistajille asetettiin sitovat CO₂-päästöraja-arvot EU-tasolla. Vuoden 2035 tavoitteena on, että kaikki uudet henkilö- ja pakettiautot olisivat nollapäästöisiä. Monet autonvalmistajat ovatkin ilmoittaneet siirtyvänsä pelkästään sähköautojen valmistukseen nopeutetulla aikataululla. Myös päivitetty raskaan kaluston CO₂-raja-arvoasetus ohjaa päästöttömien ja vähäpäästöisten ajoneuvojen valmistamiseen. (Traficom 2024e)

Vuoden 2024 lopussa Suomessa oli liikennekäytössä vajaa 2,8 miljoonaa henkilöautoa, joista runsas 4 % (118 000) oli täyssähköautoja ja 6 % ladattavia

hybridejä (159 000). Kuorma-autoja on Suomessa liikenteessä noin 90 000, joista toistaiseksi vasta runsas sata on sähkökäyttöisiä. (Traficom 2025a)

Henkilöautojen osalta maaliskuussa 2025 ensirekisteröinneistä lähes 40 % oli täyssähköautoja ja noin 20 % ladattavia (Traficom 2025b). Viime vuosina ajoneuvokannan uusiutuminen on hidastunut ja liikennekäytössä olevien autojen keski-ikä kasvanut, mikä voi osaltaan hidastaa liikenteen sähköistymistä. Vuonna 2024 uusia henkilöautoja rekisteröitiin 74 000, kun esimerkiksi vuosina 2016–2018 ensirekisteröintejä tehtiin noin 120 000 vuodessa. Henkilöautokannan sähköistyminen näyttää joka tapauksessa etenevän nopeammin kuin muutama vuosi sitten arvioitiin. Kuorma-autojen osalta vastaava kehitys on lähtenyt liikkeelle paljon hitaammin.

Tieliikenteen sähköistymistä edistävät EU-regulaatio, sähkökäyttöisten kuorma-autojen hankintatuet, sähköautojen hintojen lasku, latausinfra kehittyminen ja tuet, täyssähköisten työsuhdeautojen verokannuste sekä ETS2, joka arvioiden mukaan nostaa bensiinin ja dieselin hintaa. Toisaalta vähäpäästöisten autojen ajoneuvoveron korotus vuoden 2026 alusta vähentää sähköautojen suosiota. Taulukossa 1818 on esitetty sähkökäyttöisten henkilö- ja kuorma-autojen lukumäärien arvioitu kehitys vuoteen 2050 saakka. WAM-skenaarioon ei sisälly uusia henkilöautoliikenteen sähköistymistä edistäviä keinoja. Kuorma-autojen osalta mallinnuksessa on mukana raskaan kaluston hankintatuki mikroyrityksille sekä sähkö-, kaasu- ja vetikäyttöisten kuorma-autojen hankintatuet.

Taulukko 18. Sähkökäyttöisten henkilö- ja kuorma-autojen lukumäärät ja osuus koko ajoneuvokannasta KEITO-WEM- ja WAM-skenaarioissa.

WEM	2030	2035	2040	2050
Henkilöautot yht.	2 891 000	2 951 000	3 028 000	3 277 000
Täyssähkö	627 000 (22 %)	1 327 000 (45 %)	1 999 000 (66 %)	2 888 000 (88 %)
Plug-in hybridit	299 000 (10 %)	321 000 (11 %)	270 000 (9 %)	129 000 (4 %)
WAM	2030	2035	2040	2050
Henkilöautot yht.	2 883 000	2 942 000	3 019 000	3 269 000
Täyssähkö	637 000 (22 %)	1 337 000 (45 %)	2 009 000 (67 %)	2 897 000 (89 %)
Plug-in hybridit	302 000 (10 %)	324 000 (11 %)	273 000 (9 %)	132 000 (4 %)
WEM	2030	2035	2040	2050
Kuorma-autot yht.	94 900	96 700	97 100	102 400
Täyssähkö	2 370 (2 %)	6 730 (7 %)	13 000 (13 %)	28 400 (28 %)
Plug-in hybridit	0	0	0	0
WAM	2030	2035	2040	2050
Henkilöautot yht.	94 900	96 700	97 100	102 400
Täyssähkö	2 700 (3 %)	7 100 (7 %)	13 300 (14 %)	28 700 (28 %)
Plug-in hybridit	0	0	0	0

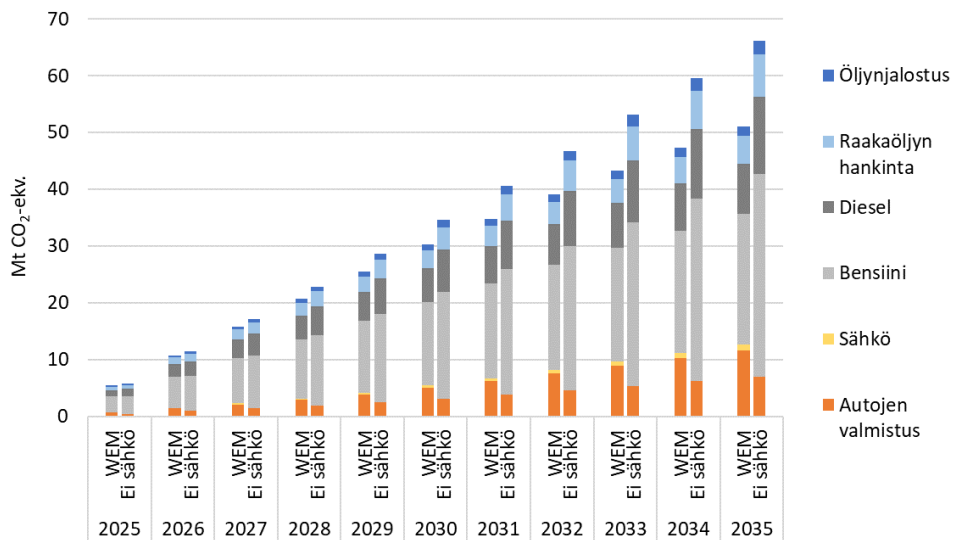
Liikenteen sähköistymisen merkittävin ympäristövaikutus on kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen. Kotimaassa syntyvien suorien päästöjen kehitystä on kuvattu luvussa 2.4.12.4.12.4.1. Jakeluvaiheen alentaminen ja valmisteverojen indeksikorotusten jäädytys kasvattavat päästöjä hetkellisesti WAM-skenaariossa. Vuoden 2030 päästöjen puolittamistavoitteesta jääddään hiukan sekä WEM:ssä (-49,6 %) että WAM:ssa (-47,5 %). Molemmissa skenaarioissa tieliikenteen sähkönkäyttö kasvaa nykyisestä alle 1 TWh:sta (1 % sähkön kokonaiskulutuksesta):

- 3,7 TWh:iin vuonna 2030 (4 % kokonaiskulutuksesta),
- 6,9 TWh:iin vuonna 2035 (6 %),
- 9,4 TWh:iin vuonna 2040 (8 %),
- 12,0 TWh:iin vuonna 2050 (10 %).

Suorien kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi tulee huomioida ajoneuvojen ja sähköntuotannon elinkaariset päästöt. Lisäksi sähköistymisellä on vaikutuksia muun muassa luonnonvarojen käyttöön, ilmanlaatuun ja meluun.

Liikenteen sähköistyminen kasvattaa päästöjä Suomen rajojen ulkopuolella, koska akkujen vuoksi sähköautojen valmistuksen kasvihuonekaasujen elinkaaripäästöt ovat polttomoottoriautoja suuremmat. Akkujen valmistuksen päästöt riippuvat akkutyypistä, valmistuspaikasta ja valmistukseen käytetyn energian päästöistä. Ankathi ym. (2024) mukaan vaihteluväli voi olla jopa 10–394 kg CO₂-ekv./kWh. Suomen ilmastopaneelin Autokalkulaattorissa (2023) käytetään oletuksena päästökerrointa 70 kg CO₂-ekv./kWh. Keskikokoiselle sähköautolle tyypillisen 42 kWh:n akun valmistus tuottaa näin ollen noin 2,9 tonnia kasvihuonekaasupäästöjä, kun itse auton valmistuksen päästöt ovat noin 6,5 t CO₂-ekv. (yhteensä 9,4 t CO₂-ekv.). Vastaavan kokoisen polttomoottoriauton valmistuksen päästöt ovat huomattavasti pienemmät, noin 5,6 tonnia. Käytön aikaiset päästöt huomioon ottaen sähköauto on kuitenkin vähäpäästöisempi jo noin 20 000 kilometrin ajon jälkeen. (Suomen ilmastopaneeli ja Suomen ympäristökeskus 2023)

WEM-skenaarion 1,3 miljoonan uuden täyssähköauton valmistuksesta aiheutuu vuoteen 2035 mennessä polttomoottoriautoihin verrattuna noin 4,6 miljoonaa tonnia enemmän päästöjä (CO₂-ekv.). Toisaalta bensiinin ja dieselin käytön päästöt vähenevät kumulatiivisesti noin 17,5 Mt CO₂-ekv. verrattuna tilanteeseen, jossa uusien sähköautojen asemesta hankittaisiin polttomoottorikäyttöisiä autoja. Sähkönkulutuksen päästöt hieman kasvavat ja öljynjalostuksen päästöt vähenevät. Vaikutus Suomen suoriin päästöihin on -17,3 Mt CO₂-ekv. jaksolla 2025–2035. Kun lisäksi lasketaan autojen valmistuksen ja raakaöljyn hankinnan päästöt, on henkilöautoliikenteen sähköistymisen vaikutus kumulatiivisiin päästöihin WEM-skenaariossa vuoteen 2035 mennessä -15,2 Mt CO₂-ekv. (kuva 50).



Kuva 50. Henkilöautojen sähköistymisen vaikutus kumulatiivisiin kasvihuonekaasupäästöihin vuosina 2025–2035 WEM-skenaariossa. "Ei sähkö" -skenaariossa kaikki uudet henkilöautot ovat polttomoottorikäyttöisiä. Kumulatiiviset päästöt ovat vuonna 2035 WEM:ssä 51,0 vrt. 66,2 Mt CO₂-ekv. (ei sähkö) ja vastaavasti WAM:ssa 52,4 vrt. 68,3 Mt CO₂-ekv.

WAM-skenaariossa sähköautojen määrät eivät juuri poikkea WEM:stä (ks. taulukko 18). Jakeluvelvoitteen lasku kuitenkin lisää hypoteettisen ei lainkaan sähköautoja -skenaarion päästöjä, jolloin sähköistymien vaikutus näyttäytyy päästöjen kannalta hieman WEM-skenaariota myönteisempänä. Kumulatiiviset, elinkaariset päästöt vähenevät WAM:ssa 15,9 Mt CO₂-ekv.

Liikenteen sähköistymisellä voi myös olla vaikutusta koko sähköjärjestelmän huoltovarmuuteen ja päästöihin, jos kaksisuuntaisen latauksen ja latauspisteiden aggregoinnin avulla ajoneuvojen akkuja aletaan hyödyntää väliaikaisina sähkövarastoina.

Sähköautojen akkujen ja sähkömoottoreiden arvoketju raaka-aineiden louhinnasta materiaalien uusiokäyttöön ja kierrätykseen saakka on pitkä. Sähköauton moottoriin ja akkuun tarvitaan teräksen ja alumiinin lisäksi noin 200 kg erilaisia metalleja, kun polttomoottorin valmistukseen käytetään alle 40 kg, lähinnä kuparia ja mangaania (IEA 2021). Sähköauton kestopagneettimoottoriin tarvitaan kuparin ja mangaanin lisäksi jonkin verran neodyymiä ja muita harvinaisia maametalleja. Materiaalien tarpeen ero polttomoottoriautoon johtuu sähköauton akuista. Nykyisin yleisin akkutyyppe NMC-litiumioniakku sisältää tekniikasta ja akun koosta riippuen noin 10 kg litiumia, 50 kg nikkeliä, 15 kg mangaania, 15 kg kobolttia, 25 kg kuparia ja 65 kg grafiittia (IEA 2021).

Kaivostoimintaan voi liittyä merkittäviä ympäristöhaittoja. Vuonna 2024 Indonesia tuotti 2,2 miljoonaa tonnia nikkeliä, lähes 60 % koko maailman tuotannosta. Koboltista 76 % tuotettiin Kongon demokraattisessa tasavallassa (USGS 2025). Indonesian nikkeliin tuotanto on nelinkertaistunut 10 vuodessa, ja maahan on rakennettu kymmeniä nikkelisulattoja ja niille sähköä tuottavia hiilivoimaloita. Kaivosten ja niiden vaatiman infrastruktuurin tieltä on kaadettu sademetsää (ks. esim. Lo ym. 2024). Kaivosjätteet ovat saastuttaneet vesistöjä, tulvat ja mutavyöryt ovat yleistyneet, sulattojen päästöt aiheuttavat haposateita ja ilmanlaatu on heikentynyt. Myös Kongosta on raportoitu luonnon monimuotoisuuden heikentymistä, juomaveden, viljelysmaiden ja kalastusalueiden pilaantumista sekä hengitystieongelmien ja keuhkosairauksien kasvua (ks. esim. Williams ym. 2021, Scheele ym. 2016).

Raaka-aineketjun kestävyyttä pyritään vahvistamaan esimerkiksi akkujen keräystavoitteita nostamalla. EU:n akkuasetus (EU 2023/1542) astui voimaan elokuussa 2023. Asetuksessa säädetään akkujen nikkeliin ja koboltin kierrätysasteeksi vähintään 95 % ja litiumille vähintään 70 % vuoteen 2031 mennessä. Lisäksi asetus velvoittaa valmistajia raportoimaan akkujen valmistuksen hiilijalanjäljen vuodesta 2025 alkaen ja vuodesta 2026 lähtien akuille tulee digitaalinen "akkupassi", joka sisältää tiedot alkuperästä, valmistusprosessista ja vastuullisuusluokituksesta. Myös EU:n kriittisten raaka-aineiden asetuksessa (EU 2024/1252) pyritään parantamaan toimitusketjujen läpinäkyvyyttä, ja strategisesti tärkeiden hankkeiden hyväksymiselle asetetaan ympäristö- ja sosiaalikestävyyttä koskevia ehtoja.

Suomen kansallisen akkustrategian (TEM 2021) tavoitteena on kehittää vastuullista akkuekosysteemiä, joka hyödyntää Suomen mineraalivaroja kestävällä tavalla. Strategian mukaan Suomi on akkumateriaalien kierrätyksessä Euroopan johtavia maita ja hiilineutraaliuden ja kestävä tuotannon tavoite ohjaa tuotekehitystä. Lisäksi akkusektori on kehittänyt yhteistyössä eurooppalaisten ja globaalien toimijoiden kanssa jäljitettävyyden konseptin ja ottanut sen käyttöön. Vuonna 2024 Suomessa tuotettiin noin 42 000 tonnia nikkeliä, 26 400 tonnia kuparia ja 1 000 tonnia kobolttia (Tukes 2025b). Vuonna 2024 käynnistyi myös litiumin tuotanto Syväjärven kaivosalueella.

Tieliikenteen sähköistyminen parantaa ilmanlaatua erityisesti kaupungeissa. Pakokaasupäästöt vähenevät, mutta liikennesuoritteiden kasvu kaupunkiseuduilla lisää katupölyn määrää. Myös meluhaitat vähenevät, sillä sähköautot ovat polttomoottoriautoja hiljaisempia. Toisaalta sähköautoilla ajetaan enemmän, mikä lisää renkaista peräisin olevia mikromuovipäästöjä (Traficom 2024e).

Taloudellisesti liikenteen sähköistyminen tuo sekä mahdollisuuksia että kustannuksia. Valtion näkökulmasta sähköautojen yleistyminen vähentää polttoaineverotuloja ja tuo uusia investointitarpeita infrastruktuuriin. Toisaalta se vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista, vahvistaa energiaomavaraisuutta ja parantaa kauppasetettä. Ilmanlaadun parantuminen ja meluhaittojen väheneminen voivat vähentää terveydenhuoltokustannuksia. Työllisyyden kannalta sähköistyminen voi aiheuttaa murroksia liikenteeseen liittyvillä toimialoilla, ja avata uusia työpaikkoja esimerkiksi akkuteknologiassa ja

älyliikenteessä. Alueellisesti sähköistyminen hyödyttää erityisesti niitä alueita, joille sijoittuu akkuklusterin uutta teollisuutta.

Sosiaalisen oikeudenmukaisuuden näkökulmasta sähköautojen korkea hankintahinta voi kasvattaa eriarvoisuutta, vaikka käyttökustannukset ovat yleensä selvästi alhaisemmat kuin polttomootoriautoissa. Hankintatuet ovat kohdistuneet niille, joilla on muutenkin varaa investoida uusiin autoihin. Myös latausinfrastruktuurin saatavuus ja kotilatausmahdollisuudet jakavat kansalaisia eri asemaan. Julkisen latausverkon kehittyminen on kuitenkin parantanut sähköauton käytettävyyttä myös pidemmällä matkoilla.

Toistaiseksi sähköautoja on hankittu eniten kaupunkiseuduilla, joilla on usein melko hyvät julkisen liikenteen palvelut. Ilmastopolitiikan näkökulmasta olisi vaikuttavampaa tukea julkiseen liikenteeseen siirtymistä siellä, missä se on mahdollista ja tehokasta, ja henkilöautoilun sähköistymistä taas erityisesti maaseudulla, jossa kannattavan julkisen liikenteen järjestäminen on vaikeampaa. Oikeudenmukaisuuden kannalta toimia tulisi kohdentaa pienituloisille ja harvaan asutuille seuduille, huomioida erilaisissa tilanteissa olevat kansalaiset ja varmistaa pääsy sähköautoon niille, jotka sitä tarvitsevat eikä vain niille, joilla siihen on varaa. (Heiskanen ym. 2023)

7.12 WAM-toimien vaikutukset

Tässä luvussa tarkastellaan miten työssä oletetut WAM-toimet vaikuttavat eri ympäristöindikaattoreihin. Tarkastelussa keskitytään pelkästään WEM- ja WAM-skenaarioiden välisiin eroihin. Toimien vaikutuksia eri ympäristöindikaattoreihin tarkastellaan kokonaisuuksina, sillä vaikutukset voivat syntyä eri toimien päällekkäisistä vaikutuksista. Koska vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin on tarkasteltu luvuissa 3 ja 4, keskitytään tässä luvussa muihin ympäristövaikutuksiin kuin ilmastovaikutuksiin.

Vuoteen 2035 mennessä sähkön ja kaukolämmön hankinta muuttuvat WAM-skenaariossa vain maltillisesti WEM-skenaarioon verrattuna. Sähkön hankinnassa merkittävää muutos voidaan nähdä oikeastaan vain ydinenergian määrässä, jonka osuus kokonaissähkön tuotannossa on WAM-skenaariossa kolme prosenttiyksikköä suurempi kuin WEM-skenaariossa. Kaukolämmön hankinnassa ydinkaukolämmön hyödyntäminen nousee noin kahdeksan prosenttiyksikköä, joka vähentää lämpöpumppuenergian määrää noin kuusi prosenttiyksikköä WAM-skenaariossa WEM-skenaarioon verrattuna. Muiden energialähteiden osalta muutokset ovat pieniä tai niitä ei ole. Nämä muutokset lisäävät energian tuotantoon kytkeytyviä ympäristövaikutuksia lisääntyvien tuotantomuotojen kohdalla ja puolestaan vähentävät ympäristövaikutuksia vähenevien tuotantomuotojen kohdalla.

WAM-skenaariossa investoidaan hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin, mikä vähentää energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöjä noin 2 Mt CO₂ vuonna 2035. WAM-skenaariossa EU:n energia- ja ilmastopolitiikkaan kytkeytyvien energiatehokkuusdirektiivin, rakennusten energiatehokkuusdirektiivin

ja uusiutuvien energialähteiden edistämisdirektiivin sekä F-kaasusetuksen toimeenpano pienentää energian kulutusta, lisää uusiutuvien energialähteiden tuotantoa ja vähentää F-kaasujen päästöjä. Toisaalta hiilidioksidin talteenotto lisää energiankulutusta, joka näkyy skenaariotuloksissa etenkin pitkällä aikavälillä bioenergian käytön kasvuna, kun BECCS-investoinnit etenevät. Nämä vaikutukset näkyvät osana TIMES-VTT-mallilla tehtyjä skenaariolaskelmia, mutta vaikutuksia ei ole eriteltävissä toimikohtaisesti.

WAM-skenaariossa oletetut valmisteverojen indeksikorotusten jäädytys PM Orpon hallituskauden ajaksi ja hiilidioksidiveron alennus lisäävät energian kulutusta ja siten kasvattavat päästöjä ja ympäristövaikutuksia. Toisaalta dieselin ja kaasun verotukien poistot ja bioenergialle asetettu valmistevero ovat esimerkkejä, joilla on energiankulutusta laskeva vaikutus olettaen, että kuluttajat toimivat rationaalisesti. Työkoneisiin, raskaaseen kalustoon ja ajoneuvokantaan sekä infrastruktuuriin kohdistuvat ohjauskeinot (esim. hankintatuet, romutuspalkkiot, sähkölatausinfra tuet ja joukkoliikenteen valtionavustukset) vähentävät näistä aiheutuvia päästöjä ja ympäristövaikutuksia. Työkone- ja lämmitysöljyn polttoaineiden jakeluvelvoitteen nostamisen ympäristövaikutukset riippuvat siitä, mitä raaka-aineita biopolttoöljyn valmistuksessa käytetään, ja toisaalta siitä, mitä polttoaineita jakeluvelvoitteeseen sisällytetään. Mahdollisia maankäytön muutosten tai maankäytön nettopäästöjä aiheuttavilla biopolttoaineiden tuotannolla on pääsääntöisesti esimerkiksi jätepohjaisiin polttoaineisiin verrattuna enemmän haitallisia ympäristövaikutuksia (Soimakallio & Koponen 2011).

WAM-skenaariossa tuotetaan lannasta biokaasua WEM-skenaariota hieman enemmän. Tämä vähentää päästöjä sekä lannankäsittelyssä että fossiilisia polttoaineita korvaavan vaikutuksen kautta ja voi myös välillisesti vähentää pellon raivausta ja siitä syntyviä päästöjä. WAM-skenaariossa turvepeltoja vetetään ja kosteikkoviljelyn pinta-alaa lisätään WEM-skenaarioon verrattuna, mikä vähentää turpeen hajoamisesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Vettämisellä on myönteisiä vaikutuksia myös muun muassa tulvasäätelyyn ja eroosioon. Maataloudessa lisäksi lihantuotanto tehostuu ja jalostus parantaa nautojen rehunkäyttöä, mikä vähentää päästöjä ja pienentää ympäristövaikutuksia. Metsien hakkuissa ei ole eroja WEM- ja WAM-skenaarion välillä, joten WAM-skenaariossa oletetut toimet eivät muuta WEM-skenaarion mukaista kehitystä.

8 Johtopäätökset

Tiina Koljonen, VTT
Sampo Soimakallio, Syke
Tarja Silfver, Luke

8.1 Keskipitkän aikavälin energia- ja ilmastotavoitteiden saavuttaminen

KEITO-hankkeen keskipitkän aikavälin energia- ja ilmastotavoitteiden saavuttamista on tarkasteltu laatimalla nykytoimia kuvaavan kehityksen, eli WEM-skenaariion avulla ja vertaamalla kehitystä lisätoimi- eli WAM-skenaarioon. WEM-skenaario perustuu pitkälti aiemman PEIKKO-hankkeen (Koljonen ym. 2024) WEM-P-skenaarioon, jota on kuitenkin päivitetty tuoreen tilasto- ja muun julkisen tiedon perusteella. Skenaariomäärittelyiden osalta keskeinen oletus oli päättää se, mitkä toimet sisällytetään nykytoimiskenaarioon ja mitkä vastaavasti lisätoimiskenaarioon. Kuten PEIKKO-hankkeessa, kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan osalta määritettiin, että 31.3.2023 mennessä käyttöön otetut tai päätetyt kansalliset politiikkatoimet kuuluvat WEM-skenaarioon ja tämän jälkeiset WAM-skenaarioon. Näin ollen PM Orpon hallituksen päätökset, jotka on jo pantu täytäntöön, on sisällytetty WAM-skenaarioon. EU-politiikan osalta WEM- ja WAM-määrittelyt noudattavat lähtökohtaisesti samaa logiikkaa, jolloin suurin osa laskennallisiin analyysihin sisällytetyistä EU-regulaatioista on mukana WEM-skenaariossa, mutta joitain poikkeuksiakin on jouduttu tekemään EU-tason määrittelyiden suhteen (ks. liite B). Laskelmien lähtökohtana yleisesti kuitenkin oli se, että EU toteuttaa energia- ja ilmastotavoitteensa WEM-skenaariossa ja Suomen osalta tarkastellaan, kuinka lähellä tai kaukana kansallinen kehitys on energia- ja ilmastotavoitteita nykytoimin sekä mahdollisin lisätoimin.

Laskennallisissa analyyseissä tarkasteltiin EU:n asettamien energia- ja kasvihuonekaasupäästötavoitteiden saavuttamista mukaan lukien uusiutuvan energian ja energian loppukulutuksen tavoitteet sekä taakanjakosektorin KHK-päästötavoite vuodelle 2030. Lisäksi arvioitiin kansallisessa ilmastolaissa määritettyjen vuosia 2030, 2040 ja 2050 koskevien päästötavoitteiden sekä vuodelle 2035 asetetun hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamista. WEM- ja WAM-skenaariotarkastelujen mukaan Suomi tavoittaisi niukasti uusiutuvan energian

62 %:n tavoitteen energian loppukulutuksesta vuonna 2030. Sen sijaan energian loppukulutuksen tavoitetta vuonna 2030 ei saavuteta, vaan sekä WEM- että WAM-skenaariossa energian loppukulutus ylittää noin 30 TWh:lla tavoitteen huolimatta siitä, että koko energiajärjestelmä tehostuu merkittävästi, kun irtaudutaan fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja koko energiainfrastruktuuri uudistuu. Samalla WEM- ja WAM-skenaarioihin sisällytetyt oletukset teollisen tuotannon, rakennuspinta-alan, liikennesuoritteiden ja palvelusektorin, mukaan lukien datakeskukset, maltillisesta kasvusta kumoavat osittain tehostumisen myötä saavutetun myönteisen kehityksen. Mikäli uusiutuvan energian investoinnit eivät toteudu oletetulla tavalla yhtä nopeasti kuin energian kysynnän kasvu, vaikeutuu myös uusiutuvan energian tavoitteen saavuttaminen.

Laadittujen laskennallisten analyysien perusteella kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen osalta EU:n ja kansallisen ilmastolain asettamia tavoitteita vuosille 2030, 2040 ja 2050 ei saavuteta nykytoimin, mutta voitaisiin saavuttaa lisätoimin, mikäli investoinnit puhtaaseen siirtymään toteutuvat riittävän nopeasti. Vuosien 2040 ja 2050 päästötavoitteiden saavuttamisen kannalta keskeistä on investoinnit teknisiin hiilinieluihin, joita oletettiin toteutuvan WAM-skenaariossa merkittävässä määrin. Myös taakanjakosektorin osalta vuoden 2030 päästötavoitteen saavuttaminen näyttää WAM-skenaariossa mahdolliselta, mikäli Suomi ei ylitä päästökiintiöitään vuosina 2025–2030.

Suurimmat haasteet liittyvät maankäyttösektorin päästökehitykseen keskipitkällä aikavälillä. Sen vuoksi Suomi jää kauaksi vuodelle 2035 asetetusta hiilineutraalisuustavoitteesta. Päästökuilu vuonna 2035 on WEM-skenaariossa peräti 38 Mt CO₂-ekv. ja WAM-skenaariossakin 34 Mt CO₂-ekv. Laadittujen kokonaispäästölaskelmien perusteella Suomi ei saavuta hiilineutraaliutta WEM-skenaariossa koko laskentajaksolla ja WAM-skenaariossakin vasta vuoden 2050 jälkeen. Maa- ja metsätalousministeriö on esittänyt metsien kasvun ja hiilinielujen vahvistamisen toimenpidepaketin (MMM 2025a), jota ei kuitenkaan sisällytetty maankäyttösektorin WAM-laskelmiin, koska lisätoimet eivät käytetyssä MELA-mallinnuksessa johtaneet parempaan metsien kasvuun. Mallinnuksiin liittyvää epävarmuutta on kuvattu tarkemmin luvussa 2.5.2.

8.2 Ympäristöön, talouteen ja ihmisiin kohdistuvat vaikutukset

Energia- ja ilmastopoliittisiin skenaarioihin liittyy erilaisia ympäristövaikutuksia, joista osa on kielteisiä ja osa myönteisiä. Kasvihuonekaasupäästöjen vähenemisellä on lähtökohtaisesti myönteisiä ympäristövaikutuksia, erityisesti, mikäli päästöjen vähentämisessä onnistutaan globaalisti ja ilmastotavoitteet saavutetaan. Myönteisiä vaikutuksia kohdistuu myös muun muassa pienhiukkasten päästöihin ja niistä aiheutuviin haitallisiin terveysvaikutuksiin, jotka vähenevät nykytasoon verrattuna. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi toteutettavat toimet voivat kuitenkin aiheuttaa myös haitallisia ympäristövaikutuksia. Uusiutumattomien polttoaineiden korvautuminen uusiutuvilla

energiälähteillä lisää infrastruktuurin rakentamista ja siihen liittyvien uusiutumattomien materiaalien käyttöä. Lisäksi haitallisia vaikutuksia voi kohdistua metsien hiilinieluihin, luonnon monimuotoisuuteen ja vesistöihin, maaperään ja pohjavesiin. Näitä aiheutuu muun muassa lisääntyvästä metsien käytöstä, maataloudesta, maankäytön muutoksista sekä maaperästä louhittavista raaka-aineista. Ilmastotoimet ja niiden toteutus vaikuttavat siihen, millä tavoin toimien aiheuttamat sosiaaliset hyödyt ja haitat jakaantuvat yhteiskunnassa.

Monien ympäristövaikutusten osalta WAM-skenaariossa oletettujen toimien aiheuttamat erot ovat vähäisiä verrattuna nykytilaan tai WEM-skenaariossa arvioituun kehitykseen. Keskeisiä eroja on hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin osalta sekä pienydinvoimassa, joiden hyödyntäminen kasvaa merkittävästi WAM-skenaariossa. Näihin teknologioihin voi liittyä kasvihuonekaasupäästöjen vähenemisen ohella sekä myönteisiä että kielteisiä muita ympäristövaikutuksia, joita on tutkittu osin vasta vähän.

WEM-skenaariossa kansantuote kasvaa noin neljäkymmentäkaksi prosenttia vuodesta 2023 vuoteen 2050. Tarjontaerien kasvusta noin 23 prosenttiyksikköä syntyy tuottavuuden kasvusta. Tarkasteltaessa kasvua kysyntätekijöiden kasvuvaiikutuksien kautta nähdään, että noin 28 prosenttiyksikköä kasvusta syntyy yksityisen kulutuksen kasvusta. WAM-skenaariossa oletettujen toimien vaikutukset kansantuotteeseen ovat monilta osin positiivisia, kun lisäinvestoinnit kasvattavat kansantuotetta ja taloudesta tulee energiaomavaraisempi. Päästöjen vähennysten lisähinta leikkaa kuitenkin kotitalouksien ostovoimaa ja kulutuskysynnän laskun vuoksi hieman alemmalle tasolle WEM-skenaarioon verrattuna. Investoinnit kuitenkin kasvattavat kansantuotetta 2020- ja 2040-luvuilla parhaimmillaan reilun 0,7 prosenttiyksikön verran. Kansantuote jää kulutuskysynnän laskun vuoksi hieman alemmalle tasolle WEM-skenaarioon verrattuna, mutta ero on koko tarkastelujakson ajan hyvin pieni.

Valtakunnan tasolla kotitalouksien taloudellinen hyvinvointi laskee hyvin vähän WAM-skenaariossa verrattuna WEM-skenaarioon. Alueellisella tasolla erot voivat kuitenkin olla suuremmat. Esimerkiksi uusiutuvan energian tuotannon mahdollisuudet, investointien kohdentuminen ja niistä syntyvät taloudelliset hyödyt vaihtelevat suuresti alueittain riippuen luonnonolosuhteista, olemassa olevasta infrastruktuurista, maankäytöstä sekä paikallisesta elinkeinorakenteesta. WAM-skenaariossa suurin positiivinen vaikutus syntyy investoinneista Pohjanlahden ja pohjoisen Suomen maakuntien alueille, joissa investointien vaikutus kasvuun on positiivinen.

8.3 Keskeiset epävarmuudet ja niihin vastaaminen

WEM- ja WAM-skenaarioiden toteutumiseen liittyy erilaista ja -asteista epävarmuutta. Muun muassa globaaliin taloustilanteeseen, inflaatioon ja valuuttakursseihin, työmarkkinoiden muutoksiin, poliittiseen vakauteen, lainsäädännön ja politiikan muutoksiin, väestörakenteen muutoksiin, eriarvoisuuteen, koulutustasoon, ilmastonmuutokseen, luonnonvarojen

saatavuuteen ja teknologiseen kehitykseen liittyy epävarmuuksia, jotka voivat vaikuttaa merkittävästi eri sektoreiden ja siten kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien kehitykseen. Suurten teollisten investointien toteutumiseen liittyvät epävarmuudet vaikuttavat jopa useilla miljoonilla hiilidioksidiekvivalenttitoimilla vuotuisiin päästömääriin. Näihin vaikuttaa erityisesti päästöoikeuden hinnan kehitys, mutta myös luvitus ja monet edellä mainitut toimintaympäristön epävarmuustekijät.

Erityisen herkkä WAM-skenaario on BECCS-investoinneille, joiden toteutumiseen liittyy huomattavia epävarmuuksia kustannusten, tarvittavien ohjauskeinojen, sekä kuljetuksia ja varastointia koskevien kansainvälisten sopimusten ja sääntöjen osalta. Suuri osa BECCS-investoinneista oletettiin integroituvan metsäteollisuuden prosesseihin, joten BECCS-investoinnit ovat riippuvaisia myös metsäteollisuuden kehityksestä. WAM-laskelmissa vuonna 2035 investointien teknisiin hiilinieluihin oletettiin aikaansaavan 1,8 Mt CO₂ negatiivisen päästön, joka on sisällytetty päästötaseeseen. Kansallinen ilmastolaki ei kuitenkaan selkeästi linjaa, voiko tekniset hiilinielut sisällyttää osaksi kansallista ilmastopolitiikkaa, mikä lisää osaltaan myös epävarmuutta.

Metsien ja muun maankäytön kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien kehitykseen liittyy huomattavia epävarmuuksia, erityisesti toteutuvien hakkuumäärien ja maaperäpäästöjen osalta. Jokaisen miljoonan kuutiometrin muutos vuotuisissa hakkuumäärissä muuttaa vuotuista metsien nettopäästöä lähes 2 Mt CO₂-ekv. (pienemmät hakkuut pienentävät nettopäästöä).

WAM-skenaarioon sisällytetyt tieliikenteen jakeluvelvoitteen maltillistaminen sekä valmisteveromuutokset lisäävät potentiaalisesti KHK-päästöjä. Kestävien uusiutuvien polttoaineiden jakeluvelvoite on osoittautunut tehokkaaksi päästövähennystoimeksi koko taakanjakosektorilla. Tulevaisuudessa ETS2-hintamekanismi ohjaa päästökehitystä myös osaltaan, mutta erityisesti vuoden 2030 jälkeiseen päästöoikeuden hintakehitykseen liittyy merkittävää epävarmuutta. Toisaalta uusiutuvien polttoaineiden jakeluvelvoite sekä tieliikenteessä että muualla taakanjakosektorilla on erityisen tärkeä toimi ennen vuotta 2030, jolloin ETS2-hinta ei vielä ohjaa riittävästi päästökehitystä.

Taakanjakosektorin EU-velvoitteiden saavuttamiseen liittyy huomattavaa epävarmuutta myös LULUCF-asetuksen velvoitteista jäämisen osalta. Tuoreen ilmastovuositiedotuksen mukaan Suomelle olisi syntymässä ensimmäisellä velvoitekaudella (2021–2025) 110–115 Mt CO₂-ekv. alijäämä ja toisella velvoitekaudella tämänhetkiseen tilanteeseen nähden 42,5 milj.t CO₂-ekv. alijäämä vuosina 2026–2029 ja 15,5 Mt CO₂-ekv. alijäämä vuonna 2030 (Ympäristöministeriö 2025e). Suomen ilmastopaneelin arvion (Seppälä ym. 2025) mukaan WEM- ja WAM-skenaarioissa oletetuilla hakkuumäärillä Suomi jää LULUCF-velvoitteistaan kausilla 2021–2025 ja 2026–2030 yhteensä noin jopa 170–200 Mt CO₂-ekv. riippuen siitä, ovatko joustot käytettävissä. Mikäli vajetta ei saada kompensoitua ostamalla nieluyksiköitä muista EU-jäsenmaista, siirtyy vajetta taakanjakosektorin kannettavaksi. Jos taakanjakosektorille syntyy vajetta eri vuosina, siirtyy vajetta seuraavalle vuodelle kertoimella 1,08. Tässä raportissa ei ole arvioitu LULUCF-velvoitteista aiheutuvan vajeen kompensoimista, eikä siitä

aiheutuvia kansantaloudellisia vaikutuksia, jos Suomi joutuu ostamaan LULUCF-yksiköitä toiselta jäsenmaalta, joka on ylittänyt velvoitteensa.

Koska Suomi ei saavuta EU:n asettamia LULUCF-velvoitteita ja LULUCF-sektorin arvioidaan olevan selvä nettopäästöjen lähde sekä WEM- että WAM-skenaariossa, on olemassa merkittävä riski, ettei metsäenergian kestävyyttä Suomessa voida osoittaa kansallisen järjestelmän kautta RED III -direktiivin vaatimusten mukaisesti. Myös hankinta-aluekohtaisen kestävyysvaatimuksen täyttyminen on monelta osin epävarmaa. Näistä syistä metsäenergian laskeminen uusiutuvien energian tavoitteisiin ja säilyminen tukikelpoisena on epäselvää (Suomen ympäristökeskus 2025).

Kiitokset

Tutkimushankkeelle on myönnetty Euroopan unionin NextGenerationEU – rahoitusta.

Lähdeluettelo

- Aatos, S., Kujanpää, L. & Teir, S. 2011. CO2 capture and geological storage applications in Finland. Geoscience for Society 125th Anniversary Volume. Geological Survey of Finland, Special Paper 49, 187–193.
- Aatos, S., Sorjonen-Ward, P., Kontinen, A. & Kuivasaari, T. 2006. Serpentiinin ja serpentiiniin hyötykäyttönäkymiä. Suomi: Kuopio. Geologian tutkimuskeskus GTK. Raporttiedosto No 5192.
- Alm, J., Wall, A., Myllykangas, J.-P., Ojanen, P., Heikkinen, J., Henttonen, H. M., Laiho, R., Minkkinen, K., Tuomainen, T., and Mikola, J. 2023. A new method for estimating carbon dioxide emissions from drained peatland forest soils for the greenhouse gas inventory of Finland, Biogeosciences, 20, 3827–3855, <https://doi.org/10.5194/bg-20-3827-2023>
- Alves Dias, P., Bobba, S., Carrara, S., & Plazzotta, B. 2020. The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility. EUR 30488 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-27016-4. <https://dx.doi.org/10.2760/303258>
- Anglo American 2024a. Anglo American suojelee lähes 3000 ha metsää Sakatin kaivoshankkeen ekologisena kompensaaationa Lehdistötiedote 11.9.2024. <https://finland.angloamerican.com/fi-fi/media/press-releases/aa-suojelee-lahes-3k-ha-metsaa-sakatin-kaivoshankkeen-ekologisena-kompensaationa>
- Ankathi, S., Bouchard, J. & He, X. 2024. Beyond Tailpipe Emissions: Life Cycle Assessment Unravels Battery's Carbon Footprint in Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal. 15. 245. 10.3390/wevj15060245. <http://dx.doi.org/10.3390/wevj15060245>
- Arola, T., Luoma, S., Korhonen, K., Jarva, J., Leppäharju, N. & Hagström, M. 2021. Energiakaivon asennus ja käyttö – Ympäristöriskitarkastelu. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimustyöraportti 17/2021. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/17_2021.pdf

- Arrigoni, A., Dolci, F., Ortiz Cebolla, R., Weidner, E., D'agostini, T., Eynard, U., Santucci, V. & Mathieux, F. 2024. Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024. JRC137953 <https://dx.doi.org/10.2760/5459>
- Atilgan, B. & Azapagic, A. 2016. An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey, *Energy Policy*, Volume 93, Pages 168-186, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.055>
- Autiola M., Suonperä E., Suvanto S., Napari M., Nylund M., Kupiainen V., Vienonen S., Forsman J., Suikkanen T., Auri J., Boman A., Mattbäck S., 2022. Happamien sulfaattimaiden kansallinen opas rakennushankkeisiin. Ympäristöministeriön julkaisu 2022:3, 152 s. Saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163782/YM_2022_3.pdf
- Balotari-Chiebao, F., Valkama, J., & Byholm, P. 2021. Assessing the vulnerability of breeding bird populations to onshore wind- energy developments in Finland. – *Ornis Fennica* 98: 59–73. <https://ornisfennica.journal.fi/article/view/133981/82566>
- Barron-Gafford, G. Pavao-Zuckerman, M., Minor, R., Sutter, L., Barnett-Moreno, I., Blackett, D., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A., Nabhan, G. & Macknick, J. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability* 2(9). <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0364-5>
- Berndt, M. L. 2015. Influence of concrete mix design on CO2 emissions for large wind turbine foundations. *Renewable Energy*, Volume 83, Pages 608-614. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.002>
- Berté, E., Falkenauer, C., Gallisa, T., Jormakka, T., Tunkelo, O. & Wegener, F. 2023. Low Carbon Roadmap. Finnish Energy. Aalto University School of Engineering. https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/06/Low_carbon_roadmap_2023_Team_FELCRO_M.pdf
- Bianchi, A., Larmola, T., Kekkonen, H., Saarnio, S. ja Lång, K. 2021. Review of greenhouse gas emissions from rewetted agricultural soils. *Wetlands* 41: 108 <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01507-5>
- Bilgili, M., Tumse, S., Tontu, M. & Sahin, B. 2021. Effect of Growth in Turbine Size on Rotor Aerodynamic Performance of Modern Commercial Large-Scale Wind Turbines. *Arab J Sci Eng* 46, 7185–7195. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05364-6>
- Blaydes, H., Gardner, E., Whyatt, J.D., Potts, S.G. & Armstrong, A. 2022. Solar park management and design to boost bumble bee populations.

Environmental Research Letters 17, 044002.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5840>

Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S.I. 2016. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. *Applied Energy*. Volume 180. Pages 327–337. ISSN 0306-2619.

<https://www.researchgate.net/publication/344541075>

Bonte, M., van Breukelen B. & Stuyfzand P.J. 2013. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water research* 47, 5088–5100. doi: 10.1016/j.watres.2013.05.049

BOOST 2025. Boost for biodiversity offsets-hanke. Ekologisen kompensaaion ohjeistus ja laskentatyökalut.

<https://boostbiodiversityoffsets.fi/tyokalut/ekologisen-kompensaaion-laskentatyokalut/>

Briellmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T. 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology* 68: 273–286. doi:10.1111/j.1574-6941.2009.0067.x.

Bringezu, S. 2015. Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. *Resources* 4 (1) 24–54.

<https://doi.org/10.3390/resources4010025>

Bruckner T., I.A. Bashmakov, Y. Mulugetta, H. Chum, A. de la Vega Navarro, J. Edmonds, A. Faaij, B. Fungtammasan, A. Garg, E. Hertwich, D. Honnery, D. Infield, M. Kainuma, S. Khennas, S. Kim, H.B. Nimir, K. Riahi, N. Strachan, R. Wiser, and X. Zhang, 2014: Energy Systems. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Saatavilla:

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter7.pdf

Brussa, G., Grosso, M., Rigamonti, L. 2023. Life cycle assessment of a floating offshore wind farm in Italy, *Sustainable Production and Consumption*, Volume 39, Pages 134-144, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.006>.

Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, A., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D.,

- Black, C., Pennington, D. & Christou, M. 2023. Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2023.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889>
- Chen, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Chen, Z., Wei, C., Bui, X.T., Tung, T.V. & Zhang, H. 2025. Ways to assess hydrogen production via life cycle analysis. *Science of The Total Environment* 977, 179355.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179355>
- Chipindula, J., Venkata, B., Hongbo, D., Raghava, K. & Ziaul, H. 2018. Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. *Sustainability*. 10. 2022. <https://doi.org/10.3390/su10062022>
- Chum, H., Faaij, A. Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., Goss Eng, A., Lucht, W., Mapako, M., Masera Cerutti, O., McIntyre, T., Minowa T. & Pingoud, K. 2011. Bioenergy. Teoksessa: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, E., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier P., Hansen, G., Schlömer, S. & von Stechow, S. (toim.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Church C. & Crawford A. 2020. Minerals and the Metals for the Energy Transition: Exploring the Conflict Implications for Mineral-Rich, Fragile States. Teoksessa: Hafner M., Tagliapietra S. (toim.). *The Geopolitics of the Global Energy Transition. Lecture Notes in Energy*, vol 73. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39066-2_12
- COM/2015/0614. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Kierto kuntoon – Kiertotaloutta koskeva EU:n toimintasuunnitelma. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0013.02/DOC_1&format=PDF
- COM/2020/98. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Uusi kiertotalouden toimintasuunnitelma Puhtaamman ja kilpailukykyisemmän Euroopan puolesta. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF
- Connolly, K. 2020. The regional economic impacts of offshore wind energy developments in Scotland. *Renewable Energy*, Volume 160, 2020, Pages 148-159. ISSN 0960-1481.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.065>

- Dahl, P. 2024. Environmental impacts of large-scale solar power construction in Finland in accordance with the EU Solar Energy Strategy. MSc thesis, Aalto University, School of Engineering, 83 s.
<https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/147b68e8-c543-42d6-9829-9935ffbcbcad2/content>
- Dechezleprêtre, A., Gennaioli, C., Martin, R., Muûls, M. & Stoerk, T. 2022. Searching for carbon leaks in multinational companies. *Journal of Environmental Economics and Management*, 112, p. 102601.
<https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102601>
- Díaz, S. & Malhi, Y. 2022. Biodiversity: Concepts, Patterns, Trends, and Perspectives. *Annual Review of Environment and Resources*. 47:31-63.
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120120-054300>
- EASAC 2025. Security of Sustainable Energy Supplies. European Academics Science Advisory Council. EASAC Report No. 47. Vienna, Austria. ISBN: 978-3-7001-9738-6.
https://easac.eu/fileadmin/user_upload/EASAC_SoSES_final_310325.pdf
- EC 2024. Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2025. Update of June 2024. European Commission, Directorate-General, Climate Action.
- Eerola, T., Komnitsas, K. Insights on Public Acceptance of Major European Lithium Mine Projects. *Mining, Metallurgy & Exploration* (2025).
<https://doi.org/10.1007/s42461-025-01280-7>
- EK, Elinkeinoelämän Keskusliitto, 2025. Suomen vihreät investoinnit. Saatavilla:
<https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/>
- EK, Elinkeinoelämän keskusliitto, 2024a. Luontotiekartat tuovat konkretiaa toimialojen monimuotoisuustyöhön. Uutinen 24.5.2024.
<https://ek.fi/ajankohtaista/uutiset/luontotiekartat-tuovat-konkretiaa-toimialojen-monimuotoisuustyohon/>
- EK 2024b. Suomen vihreät investoinnit. Dataikkuna. Elinkeinoelämän keskusliitto.
<https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/>
- Ellen MacArthur Foundation 2019. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change.
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture> [viitattu 15.5.2025]
- Ellen MacArthur Foundation 2024. Measurement and reporting for the circular economy.
https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/measurement/overview?gad_source=1&gad_campaignid=17814051975&gclid=CjwKCAjwulbBB

[hBvEiwAsNypvebViOH1LZcgQx6DSXqSc9wMxfWsA2ZB5kQ64BGFhY1c88PRV6JOLhoCnmoQAvD_BwE](https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkon-kuukausitilasto/) [viitattu 19.5.2025]

Energiateollisuus 2024. Sähkön kuukausitilasto. Sähköntuotanto ja polttoaineet.
<https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkon-kuukausitilasto/>

ESABCC 2025. European Scientific Advisory Board on Climate Change. Scaling up carbon dioxide removals – Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU. 21.5.2025. <https://climate-advisory-board.europa.eu/reports-and-publications/scaling-up-carbon-dioxide-removals-recommendations-for-navigating-opportunities-and-risks-in-the-eu>

EU 2023/956. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj>

EU 2023/959. Directive (EU) 2023/959 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading system. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/959/oj>

EU 2023/1185. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1185 of 10 February 2023 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings of recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2023/1185/oj

EU 2023/1542. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/>

EU 2023/1791 Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>

EU 2023/2413. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>

EU 2024/1252. Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>

EU 2024/1275. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>

EU 2024/1760. Directive (EU) 2024/1760 of the European Parliament and of the Council on Corporate Sustainability Due Diligence (CSDDD). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1760/2025-04-17/>

EU 2024/1781. Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng>

EU 2023/1805. Asetus 2023/1805/EU uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden käytöstä meriliikenteessä sekä direktiivin 2009/16/EY muuttamisesta. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1805>

Euroopan Komissio 2022. Legislation for the organics sector. Viitattu 14.4. 2025. https://agriculture.ec.europa.eu/farming/organic-farming/legislation_en

Euroopan komissio 2024. 2040 climate target. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2040-climate-target_en

Euroopan Komissio 2025. Organic farming. Policy, rules, organic certifications, support and criteria for organic farming. Viitattu 14.4. 2025. https://agriculture.ec.europa.eu/farming/organic-farming/legislation_en

Euroopan komissio 2025a. Mediatiedote 26.2.2025. A Clean Industrial Deal for competitiveness and decarbonisation in the EU. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_550

Euroopan komissio 2025b. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fi

Euroopan komissio 2025c. Puhtaan teollisen kehityksen ohjelma. https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_fi

Eurostat 2025a. Material footprint. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_PC020_custom_30_26894/default/table?lang=en

- Eurostat 2025b. Production and Consumption.
<https://ec.europa.eu/eurostat/cache/scoreboards/circular-economy/#>
- Farina, A. & Anctil, A. 2022. Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally. Resources, Conservation and Recycling, Volume 176, ISSN 0921-3449.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105938>
- Fingrid 2021. Verkkovisio.
https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/fingrid_verkkovisio.pdf
- Fingrid 2024a. Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q3 2024.
<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat/>
- Fingrid 2024b. Merituulivoiman alustavat liityntämahdollisuudet Fingridin kantaverkkoon 2030-luvulla.
<https://www.sttinfo.fi/files/69819787/70198148/90041/fi>
- Fingrid 2024c. Verkkokiikari. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/verkkokiikari/>
- Fingrid 2025. Aurinkovoimaennusteessa käytetty kokonaiskapasiteetti.
<https://data.fingrid.fi/datasets/267>
- Finlex 2022. Ilmastolaki. Suomen säädöskokoelma 423/2022. Saatavilla:
<https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2022/423>
- Finlex 2024. Laki uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä annetun lain muuttamisesta ja väliaikaisesta muuttamisesta. 841/2024. Saatavilla: [Laki uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä annetun lain muuttamisesta ja väliaikaisesta muuttamisesta 841/2024 | Suomen säädöskokoelma | Finlex.](https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2024/841)
- Fornaro, P. 2021. ONKO SUOMALAINEN POLITIIKKA POLARISOITUNUT? Elinkeinoelämän tutkimuslaitos ETLA. [Microsoft Word - polarisaatio_brief_pohjassa.docx](#)
- Forsius, M., Holmberg, M., Junttila, V., Kujala, H., Schulz, T., Paunu, V.-V., Savolahti, M., Minunno, F., Akujärvi, A., Bäck, J., Grönroos, J., Heikkinen, R.K., Karvosenoja, N., Mäkelä, A., Mikkonen, N., Pekkonen, M., Rankinen, K. and Virkkala R. 2023. Modelling the regional potential for reaching carbon neutrality in Finland: Sustainable forestry, energy use and biodiversity protection. Ambio: 52: 1757–1776.
<https://doi.org/10.1007/s13280-023-01860-1>
- Forslund, T., Gorst, A., Briggs, C., Azevedo, D., & Smale, R. (2022). Tackling root causes, Halting biodiversity loss through the circular economy. Sitra Studies 205. <https://www.sitra.fi/en/publications/tackling-root-causes/>

- Friedrichs, P., Långbacka, B., Bertelli, M. & Kivinen, M. 2025. Finnish Battery Minerals for the Green Transition in the Context of Global Value Chains and Markets. Geological Survey of Finland, Open File Research Report 36/2025. <https://hakku.gtk.fi/publications?id=100164>
- Frilander, O., Holmgren, M., Lukkaroinen, T., Mikkola, H., Sillanaukee, O., Teittinen, T. & Zhu, Y. 2024. Kiertotalous ja resilienssi: Kiertotalouden potentiaali kansallisen kriisinsietokyvyn vahvistamisessa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:18. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-447-7>
- Frischknecht, R., Althaus, H.J., Bauer, C., Doka, G., Heck, T., Jungbluth, N., Kellenberger, D. & Nemecek, T. 2007. The environmental relevance of capital goods in life cycle assessments of products and services. International Journal of Life Cycle Assessment. 11, 1–11. 49 JEC 2017. JEC Well-to-wheels analyses (WTW). https://esu-services.ch/fileadmin/download/Frischknecht-2007-CapitalGoods_IntJLCA.pdf
- Gaia 2023. Merituulivoiman aluetaloudelliset vaikutukset. <https://suomenuusiutuivat.fi/media/merituulivoiman-aluealousvaikutukset-loppuraporttiluonnos-2.5.2023-1.pdf>
- Gaia 2024. Vihreän siirtymän investointien talousvaikutukset EK:n vihreän siirtymän hankkeiden dataikkunan pohjalta. https://ek.fi/wp-content/uploads/2024/10/Loppuraportti_Vihrean-siirtymän-investointien-vaikutusten-arviointi-1.pdf
- Gasgrid 2025. Nordic Hydrogen Route. <https://gasgrid.fi/kehitys/nordic-hydrogen-route/>
- Gaultier, S. P., Lilley, T. M., Vesterinen, E. J., & Brommer, J. E. (2023). The presence of wind turbines repels bats in boreal forests. Landscape and Urban Planning, 231, 104636. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104636>
- Geerken, T., Schmidt, J., Boonen, K., Christis, M., & Merciai, S. 2019. Assessment of the potential of a circular economy in open economies – Case of Belgium. Journal of Cleaner Production, 227, 683-699. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.120>
- Global Carbon Atlas 2025. Viitattu 29.5.2025. <https://globalcarbonatlas.org/>
- Goita, E. G., Beagle, E. A., Nasta, A. N., Wissmiller, D. L., Ravikumar, A., & Webber, M. E. 2025. Effect of hydrogen leakage on the life cycle climate impacts of hydrogen supply chains. Communications Earth & Environment, 6(1)160. <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02141-3>

- Granskog, A., Gulli, C., Melgin, T., Naucier, T., Speelman, E., Toivola, L. & Walter, D. 2018. Cost-efficient emission reduction pathway to 2030 for Finland. Opportunities in electrification and beyond. Sitra Studies 140.
<https://www.sitra.fi/wp/wp-content/uploads/2018/11/cost-efficient-emission-reduction-pathway-to-2030-for-finland1.pdf>
- GTK 2025. Kriittiset ja strategiset raaka-aineet. Internet-artikkeli. Geologian tutkimuskeskus. Vierailtu 6.6.2025.
<https://www.gtk.fi/ajankohtaista/kriittiset-ja-strategiset-raaka-aineet/>
- Gustafsson, M., Blomqvist, G., Järtskog, I., Svensson, N., Kulovuori, S., Denby, B.R., Wærsted, E.G., Stojiljkovic, A. Karvosenoja, N., Grythe, H., Yttri, K.-E., Thorsteinsson, T., Johansson, C., Norman, M., Engardt, M., Josefsson A. 2024. NORDUST II Nordic Road Dust Project Phase II (2024). Final report. NordFoU report number 2024-01. EAN number: 978-87-7595-122-2. https://api.vejdirektoratet.dk/sites/default/files/2024-08/NorDust2_final_report_0.pdf
- Haakana, M., Ollila, P., Regina, K., Riihimäki, H. & Tuomainen, T. 2015. Menetelmä maankäytön kehityksen ennustamiseen: pinta-alojen kehitys ja kasvihuonekaasu-päästöt vuoteen 2040. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2015. Luonnonvara-keskus (Luke), Helsinki. 32 s.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-103-7>
- Hadzic, M., Nystrand, M., Auri, J., Österholm, P., Korppoo, M., Laamanen, T., Korhonen, A., Räisänen, J., Huttunen, M., Vento T. ja Ihme, R. 2020. Toimintamallit happamuuden ennakoimiseksi ja riskien hallitsemiseksi turvetuotannossa. Sulfa II -hankkeen loppuraportti. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja 16/2020. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5160-6>
- Haila, K., Salminen, V., Kiiskinen, J., Roiha, U., Leppänen, R. & Kiemunki, J. (2023). Kiertotalouden strategisen ohjelman arviointi, Valtioneuvoston julkaisuja 2023:32. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-558-0>
- Hakala, E., Erkamo, S., Pyykönen, J., Tuomenvirta, H., Tynkkynen, O., Berninger, K., Vihma, A. 2021. Ilmastonmuutos ja Suomen turvallisuus: Uhat ja varautuminen kokonaisturvallisuuden toimintamallissa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:52.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-386-9>
- Hamberg, L., Henttonen, H.M. & Tuomainen, T. 2016. Puusta valmistettujen tuotteiden hiilivaraston muutoksen laskenta kasvihuonekaasuinventaariossa – Menetelmäkehitys Suomen kasvihuonekaasuinventaarioon. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 73/2016. Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki. 44 s.
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-340-6>

- Hankkija 2025. Luonnonmukaisen viljanviljelyn lannoitusohjelma. Viitattu 14.4. 2025.
<https://www.hankkija.fi/tuotantopanokset/luomutuotanto/lannoitteet/ia-luonnonmukaisen-viljanviljelyn-lannoitusohjelma-2032274/>
- Hansson, H, Farsaei, A. & Syri, S. 2020. Wind power impact on market power on the Finnish electricity market. Conference: 17th International conference on the European energy market (EEM20). Stockholm, Sweden.
https://www.researchgate.net/publication/344541075_Wind_power_impact_on_market_power_on_the_Finnish_electricity_market
- HE 169/2020 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi kiinteistöverolain 3 §:n muuttamisesta.
https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_169+2020.aspx
- HE 147/2024 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi merituulivoimasta talousvyöhykkeellä ja siihen liittyviksi laeiksi.
https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Documents/HE_147+2024.pdf
- HE 37/2025 vp Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista annetun lain muuttamisesta ja uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä annetun lain 7 §:n 7 momentin kumoamisesta.
<https://www.eduskunta.fi/pdf/HE+37/2025>
- Heckmann, W. & Reinmann, T. 2020. Impact assessment of F-gas free medium voltage switchgear - Modeling scenarios of MV switchgear installation development and impact on SF6 emissions. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, IEE in Kassel. Saatavilla: https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Projekte/f-gas-free/SF6_study-public_report-Fraunhofer_IEE-final2.pdf
- Heiskanen, E., Kousa, I., Matschoss, K. & Pyrhönen, T. 2024. Liikenteen sähköistymisen alueellinen reiluus. Teoksessa J.M. Korhonen (toim.), Oikeudenmukainen siirtymä Suomessa 2025 (s. 159–185). Kalevi Sorsa -säätiö & Into Kustannus. <https://sorsafoundation.fi/wp-content/uploads/oikeudenmukainen-siirtyma-suomessa-2025-raportti.pdf>
- Helmi-elinympäristöohjelma 2021–2030. 2021. Helmi-elinympäristöohjelma 2021–2030. Valtioneuvoston periaatepäätös. Valtioneuvoston julkaisuja 2021:83. 74 s. Helmi-elinympäristöohjelma 2021–2030. Valtioneuvoston periaatepäätös.
- Henriksen, M.S., Matthews, H.S., White, J., Walsh, L., Grol, E., Jamieson, M., & Skone, T. J. 2024. Tradeoffs in life cycle water use and greenhouse gas emissions of hydrogen production pathways. International Journal of

- Hydrogen Energy, 49, 1221–1234.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.079>
- Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempinen, R. & Salminen O. 2017. MELA2016 Reference Manual. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 547 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-358-1>
- Honkatukia, J. 2024. Kurkistus nurkan taakse – pitkän aikavälin talouskasvusta ja työllisyydestä. Työpoliittinen aikakauskirja 1/2024. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki.
- Honkatukia, J. 2019. The FINAGE/REFINAGE General Equilibrium Models of the Finnish Economy. Teoksessa: Honkatukia, J., Alimov, N., Huovari, J., Ruuskanen, O.-P. & Lehtomaa, J. 2019. Alueellisen taloustiedon tietokanta. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2019:41. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-753-6>
- Honkatukia, J. 2009. VATTAGE – A Dynamic, Applied General Equilibrium Model of the Finnish Economy. Research reports 150, VATT, Helsinki.
- Huhtanen, P., Astaptsev, A. ja Nousiainen J. 2022 Methane production inventory between 1960–2020 in the Finnish dairy sector and the future mitigation scenarios. Agricultural and Food Science 31: 1-11
<https://journal.fi/afs/article/view/113752>
- Huttunen I., Lehtonen H., Huttunen M., Piirainen V., Korppoo M., Veijalainen N., Viitasalo M. & Vehviläinen B. 2015. Effects of climate change and agricultural adaptation on nutrient loading from Finnish catchments to the Baltic Sea. Science of the Total Environment 529:168-181.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.055>
- Hynynen, J., Huuskonen, S., Kujala, S.T., Kniivilä, M., Lehtonen, A., Melin, M., Albrich, K., Demmler, J., Haapanen, M., Haikarainen, S., Heikkinen, J., Hirvelä, H., Honkaniemi, J., Hökkä, H., Kilpeläinen, H., Korhonen, K.T., Kärkkäinen, H., Kärkkäinen, K., Lehtonen, M., Luorinen, J., Martínez García, E., Miina, J., Mutanen, A., Mäkinen, H., Palmu, S., Salminen, H., Siipilehto, J., Siiskonen, H., Stenberg, L., Szejner, P. ja Tikkasalo, O.-P. 2024. Synteesiraportti: Metsien kasvun lisäämisen keinot ja vaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 92/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 52 s.
- Hyvärinen, E., Juslén, A., Kemppainen, E., Uddström, A. & Liukko, U.-M. 2019. Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2019. Ympäristöministeriö ja Suomen ympäristökeskus. Saatavilla:
<http://hdl.handle.net/10138/299501>
- Hänninen O., Karvosenoja N. & Kukkonen J. 2019. Katupölyn ja puun pienpolton haittojen vähentäminen. Ilmansuojelu 1/2019 s. 16–21.

- IEA 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Revised version. World Energy Outlook Special Report. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA 2022. Sustainable and Responsible Critical Mineral Supply Chains. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/sustainable-and-responsible-critical-mineral-supply-chains>
- IEA 2023. World Energy Statistics and Balances. Paris: International Energy Agency.
- IEA 2024. World Energy Outlook 2024. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>
- IEA 2025. Global Critical Minerals Outlook 2025. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>
- IPCC, 2005. International Panel on Climate Change. Special Report: Carbon Dioxide Capture and Storage. [WWW-dokumentti]. http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/SRCCS-final/SRCCS_WholeReport.pdf
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (toim.). IGES, Japan. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC 2013 (Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W. ym.). Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. IPCC AR5 WG1 2013. s. 659–740. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- IPCC 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (toim.). Published: IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html>
- IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (toim.). Published: IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- Jalkanen, J., Nieminen, E., Ahola, A., Salo, P., Pekkonen, M., Luoma, E., Kettunen, A., Halme, P., Pappila, M., Kotiaho, J. & Kujala, H. 2025.

- Heikennys- ja hyvitysalueiden luonnonarvohehtaarien laskeminen luonnonsuojelulain mukaisessa ekologisessa kompensaatiossa. Suomen ympäristökeskuksen julkaisuja 1/2025.
<http://hdl.handle.net/10138/591139>
- Jenkins, K., Sovacool, B.K. & McCauley, D. 2018. Humanizing sociotechnical transitions through energy justice: An ethical framework for global transformative change. *Energy Policy* 117: 66–74.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.036>
- JRC 2020. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study. European Commission, Joint Research Centre.
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en>
- Julkisten hankintojen neuvontayksikkö. 2024. Vastuullisuus ja kehittäminen. Sosiaaliset näkökohdat. 11.10.2024.
<https://www.hankinnat.fi/vastuullisuus-ja-kehittaminen/sosiaaliset-nakokohdat>
- Junttila, V., Minunno, F., Peltoniemi, M., Forsius, M., Akujärvi, A., Ojanen, P and Mäkelä A. (2023). Quantification of forest carbon flux and stock uncertainties under climate change and their use in regionally explicit decision making: Case study in Finland. *Ambio*: 52: 1716–1733.
<https://doi.org/10.1007/s13280-023-01906-4>
- Järvinen, L. 2025. Effect of impaired power quality on alkaline water electrolyzer performance and controllability. Doctoral Dissertation. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 1185. Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/168658>
- Ikkala, L., Allonen, O. & Maanavilja, L. 2025. Aurinkoenergiaa vetetyille turvemaille – Haastattelutuloksia REPower-CEST-hankkeesta. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 1/2025.
<https://hakku.gtk.fi/fi/publications?id=100118>
- Kaitila, V., Kuusela, O-P., Kuusi, T., Pohjola, J. & Soimakallio, S. 2022. Euroopan komission ehdottaman hiilirajamekanismin vaikutuksia Suomessa ja EU:ssa. ETLA Raportti No 128. <https://pub.etla.fi/ETLA-Raportit-Reports-128.pdf>
- Kallio J. Korhonen K. Wennerström M. Sallasmaa O. Witick I. (2019). Helsingin geoenergia-potentiaali. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:25. Helsingin kaupunki.
<https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-25-19.pdf>
- Karhinen, S., Savolainen, H., Meriläinen, T., Soimakallio, S., Sokka, L. Springare, S. & Seppälä, J. 2025. Carbon Handprint of Exports - a Framework to Evaluate Potential Positive Trade Impacts on Global Emissions.

Available at

SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5185623> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5185623>

- Karhinen, S., Savolainen, H., Heikkinen, M & Ulvi, T. 2023. Alueellisten talous- ja ympäristövaikutusten arviointi maakuntien ENVIMAT-malleilla. Esimerkkejä Pohjois-Pohjanmaalta ja Kainuusta. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 20/2023. <https://helda.helsinki.fi/items/a364560c-fae2-454a-841d-90e111b6803d>
- Karhinen, S., Savolainen, H., Meriläinen, T., Soimakallio, S., Sokka, L. Springare, S. & Seppälä, J. 2025. Carbon Handprint of Exports - a Framework to Evaluate Potential Positive Trade Impacts on Global Emissions. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5185623>
- Karvosenoja, N. 2008. Emission scenario model for regional air pollution. Monographs Boreal Environ. Res. 32. <http://hdl.handle.net/10138/39332>
- Kivimaa, P. 2024. Security in Sustainable Energy Transitions: Interplay between Energy, Security, and Defence Policies in Estonia, Finland, Norway, and Scotland. Cambridge University Press, Cambridge & New York. <https://doi.org/10.1017/9781009368155>
- Kivimaa, P. & Sivonen, M.H. 2021. Interplay between low-carbon energy transitions and national security: An analysis of policy integration and coherence in Estonia, Finland and Scotland. Energy Research & Social Science 75: 102024. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102024>
- Kivimaa, P. & Sivonen, M.H. 2023. How will renewables expansion and hydrocarbon decline impact security? Analysis from a socio-technical transitions perspective. Environmental Innovation and Societal Transitions 48:100744. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2023.100744>
- Kivimaa, P., Mosoni, C. & Sivonen, M.H. 2024. The advancing energy transition requires a broader approach to energy security. Action recommendations of the research project IDEALE. September 2024. SBN 978-952-11-5698-4 (online). https://www.syke.fi/sites/default/files/documents/Action-recommendations-of-the-research-project-IDEALE_2024_0_2.pdf
- Kivinen, M. & Aumo R. (eds) 2015. Kaivostoiminta ja malminetsintä Suomessa: Teollisuuden tukijalasta verkostoyhteiskunnan osaksi. Summary: Mining and mineral exploration in Finland: From a national industrial interest to an actor in the network society. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 221. <https://hakku.gtk.fi/fi/publications?id=20416>
- Koljonen T., Soimakallio, S., Lehtilä, A., Similä, L., Honkatukia, J., Hildén, M., Rehunen, A., Saikku, L., Salo, M., Savolahti, M., Tuominen, P. & Vainio, T. 2019. Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. Helsinki: Valtioneuvosto. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-656-0>

- 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. 150 s. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Technology, No. 366.
<https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2020/T366.pdf>
- Koljonen, T., Honkatukia, J., Maanavilja, L., Ruuskanen, O-P, Similä, L. & Soimakallio, S. 2021. Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset (HIISI). Synteesiraportti – Johtopäätökset ja suositukset. Helsinki: Valtioneuvosto. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:62. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163638>
- Koljonen, T., Silfver, T., Soimakallio, S., Koreneff, G., Lehtilä, A., Markkanen, J., Vainio, T., Aakkula, J., Haakana, M., Hirvelä, H., Lehtonen, H., Mutanen, A., Myllykangas, J-P., Viitanen, J., Vikfors, S., Forsberg, T. & Koskivaara, O. 2024. Perusskenaariot energia- ja ilmastotoimien kokonaisuudelle kohti päästöttömyyttä (PEIKKO). Helsinki: Valtioneuvosto. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:26. Saatavilla: <https://tietokayttoon.fi/julkaisut/raportti?pubid=URN:ISBN:978-952-383-219-0>
- Koljonen, T. ym. 2025. Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan toimet ja skenaariot (KEITO) - pitkän aikavälin skenaariot. VTT Technology. Julkaistaan syksyllä 2025.
- Kontula T. & Raunio A. (toim.). 2018. Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja. Osa 1 - tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristö 5/2018. 388 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4816-3>
- Korhonen, J.M., (toim.) 2025. Oikeudenmukainen siirtymä Suomessa 2025 (s. 159–185). Kalevi Sorsa -säätö & Into Kustannus.
<https://sorsafoundation.fi/wp-content/uploads/oikeudenmukainen-siirtyma-suomessa-2025-raportti.pdf>
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M. & Viiri, H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 59/2017. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 86 s. + liitteet. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-467-0>
- Korhonen, K.T., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Ihalainen, A., Melin, M., Pitkänen, J., Rätty, M., Sirviö, M. & Strandström, M. 2021. Forests of Finland 2014–2018 and their development 1921–2018. Silva Fennica 55(5). 49 s. + liitteet.
<https://doi.org/10.14214/sf.10662>

- Korhonen K. T., Rätty M., Haakana H., Heikkinen J., Hotanen J.-P., Kuronen M., Pitkänen J. (2024). Forests of Finland 2019–2023 and their development 1921–2023. *Silva Fennica* vol. 58 no. 5 article id 24045.
<https://doi.org/10.14214/sf.24045>
- Korvenmaa, L., Moisio, M., Kuusela-Opas, E. & Häkämies S. 2024. Energy Poverty in Finland. Gaia Consulting Oy.
https://energiavirasto.fi/documents/11120570/209788025/Energy%20Poverty%20in%20Finland_report_2024.pdf/abe48e9a-f847-63b9-c6fa-4acae25fa88a/Energy%20Poverty%20in%20Finland_report_2024.pdf
- Koskela, S., Mäenpää, I., Mattila, T., Seppälä, J., Saikku, L., Korhonen, M.-R., Suorsa, M., Österlund, H., Hippinen, I. 2013. Suomen talouden materiaa livirrat vuonna 2008 ja resurssitehokkuuden tehostamisen vaikutukset vuoteen 2030. Ympäristöministeriön raportteja 26.
<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/40781>
- Kotiaho, J.S., Ahlvik, L., Bäck, J., Hohti, J., Jokimäki, J., Kallio, K.P., Ketola, T., Kulmala, L., Lakka, H.-K., Lehikoinen, A., Oksanen, E., Pappila, M., Sääksjärvi, I.E. & Peura, M. 2021. Metsäluonnon turvaava suojelun kohdentaminen Suomessa. Suomen Luontopaneelin julkaisuja 4/2021.
<https://doi.org/10.17011/jyx/SLJ/2021/4>
- Kujanpää, L., Reznichenko, A., Saastamoinen, H., Mäkkikouri, S., Soimakallio, S., Tynkkynen, O., Lehtonen, J., Wirtanen, T., Linjala, O., Similä, L., Keränen, J., Salo, E., Elfving, J. & Koponen, K. 2023. Carbon dioxide use and removal, prospects and policies. Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2023:19. ISBN PDF 978-952-383-197-1, ISSN PDF 2342-6799.
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-197-1>
- Kulha, K., Sormunen, H., Leino, M., Setälä, M., Taskinen, M., & Jäske, M. 2021. Ilmastotoimia arvioivan kansalaisraad in loppuraportti. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:21. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-388-1>
- Kuusi, T., Björklund, M., Kaitila, V., Kokko, K., Lehmus, M., Mehling, M., Oikarinen, T., Pohjola, J., Soimakallio, S. & Wang, M. 2020. Carbon Border Adjustment Mechanisms and Their Economic Impact on Finland and the EU. Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2020:48.
https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162510/VNTEAS_2020_48.pdf
- Kärkkäinen, L., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Kniivilä, M., Kohl, J., Korhonen, K.T., Kurttila, M., Lempinen, R., Miina, J., Mutanen, A., Neuvonen, M., Nieminen, M., Ollila, P., Piirainen, S., Sarkkola, S., Tolvanen, A., Tuomainen, T., Tyrväinen, L., Vatanen, E. & Viitanen, J. 2022. Taustaselvitys Kansallinen metsästrategia 2035:n valmistelua varten.

Skenaarioihin perustuva tarkastelu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 61/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 118 s. + liitteet.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-474-6>

Laasasenaho, K., Lauhanen, R. & Luhtala, M. 2024. Aurinkovoimallat turvetuotannosta vapautuvilla suonpohjilla ovat massiivisia rakennustyömaita – lisätietoja ympäristövaikutuksista ja maankäyttöristiriidoista tarvitaan. Suo 75(1–2):73–78 – Puheenvuorot.

Ladenburg, J., Hevia-Koch, P., Petrović, S. & Knapp, L. 2020. The offshore-onshore conundrum: Preferences for wind energy considering spatial data in Denmark. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 121, 2020, 109711. ISSN 1364-0321.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109711>

Lafitte, A., Sordello, R., Ouédraogo, D. Y., Thierry, C., Marx, G., Froidevaux, J., Schatz, B., Kerbiriou, C., Gourdain, P., Reyjol, Y., 2023. Existing evidence on the effects of photovoltaic panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity. Environmental Evidence 12, 25. <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00318-x>

Laine-Petäjäkangas, A., Maanavilja, L., Allonen, O., Sutinen, H. & Vähäkuopus, T. 2023. Turvetuotannosta vapautuvien suonpohjien hiiliviisas jatkokäyttö. Summary: Carbon-wise after-use of peat extraction sites. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 82/2023.
<https://hakku.gtk.fi/fi/publications?id=22259>

Lambert, Q., Bischoff, A., Cueff, S., Cluchier, A., Gros, R., 2021. Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO2 effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate. Land Degradation & Development 32, 5190–5202.
<https://doi.org/10.1002/ldr.4101>

Lange, S., Pohl, J. & Santarius, T. 2020. Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? Ecological Economics, Vol. 176:106760. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>.

Lavikko, S. 2017. Geological and mineralogical aspects on mineral carbonation. Åbo Akademi: Academic dissertation. ISBN 978-952-12-3485-9 (pdf).
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-12-3485-9>

Lehikoinen, A., Aalto, J., Boström, C., Ekroos, J., Herzon, I., Hyytiäinen, K., Häyrynen, S., Jarva, J., Jokimäki, J., Kotiaho, J. S., Kuussaari, M., Kosenius, A.-K., Laine, I., Mykrä, H., Onkila, T., Paloniitty, T., Pappila, M., Silfverberg, O., Sääksjärvi, I.E., Wolff, L.-A. ja Rytteri, S. 2024. Maatalousalueiden luonnon monimuotoisuuden edistämisen keinot ja hyödyt Suomessa. Luontopaneelin yhteenveto ja suositukset luontopolitiikan suunnittelun ja päätöksenteon tueksi. Suomen Luontopaneelin julkaisuja 2A/2024. <https://luontopaneeli.fi/wp->

content/uploads/2024/06/suomen-luontopaneelin-julkaisuja-2a-2024-maatalousalueiden-luonnon-monimuotoisuus.pdf

Lehtomäki, H., Korhonen A., Asikainen, A., Karvosenoja, N., Kupiainen K., Paunu, V.-V., Savolahti, M., Sofiev, M., Palamarchuk, Y., Karppinen, A., Kukkonen, J. & Hänninen, O. 2018. Health Impacts of Ambient Air Pollution in Finland. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15(4), 736. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040736>

Lehtomäki, J. 2024. Ajankohtaisia asioita luontopolitiikassa. Alueellisen LUMO-ohjelman KICK-OFF Webinaari. 29.11.202. https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/56015/LUMO_Kick_Off_Luontopolitiikan_ajankohtaiset_Naturpolikens_aktualiteter_YM_Lehtom%C3%A4ki.pdf/3e91a50a-8c3c-e2ab-1298-ea00d4f4ed17?t=1733315649462

Lehtonen, H. 2001. Principles, structure and application of dynamic regional sector model of Finnish agriculture. Academic dissertation. Systems Analysis Laboratory, Helsinki University of Technology. Publisher: Agrifood Research Finland, Economic Research (MTTL). Publications 98. Helsinki. 265 pages. <http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512256894/>

Lehtonen, H. 2015. Evaluating adaptation and the production development of Finnish agriculture in climate and global change. *Agricultural and Food Science* 24: 219-234. <http://ojs.tsv.fi/index.php/AFS/article/view/51080>

Lehtonen, H. & Rankinen, K. 2015. Impacts of agri-environmental policy on land use and nitrogen leaching in Finland. *Environmental Science and Policy* 50: 130–144. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.02.001>

Lehtonen, H. & Niskanen, O. 2016. Promoting clover-grass: Implications for agricultural land use in Finland. *Land Use Policy* 59: 310-319. DOI:10.1016/j.landusepol.2016.09.005

Lehtonen, H., & Niemi, J. 2018. Effects of reducing EU agricultural support payments on production and farm income in Finland. *Agricultural and Food Science*, 27(2), 124–137. <https://doi.org/10.23986/afsci.67673>

Lehtonen, A., Aro, L., Haakana, M., Haikarainen, S., Heikkinen, J., Huuskonen, S., Härkönen, K., Hökkä, H., Kekkonen, H., Koskela, T., Lehtonen, H., Luorinen, J., Mutanen, A., Nieminen, M., Ollila, P., Palosuo, T., Pohjanmies, T., Repo, A., Rikkonen, P., Rätty, M., Saarnio, S., Smolander, A., Soinne, H., Tolvanen, A., Tuomainen, T., Uotila, K., Viitala, E.-J., Virkajärvi, P., Wall, A. & Mäkipää, R. 2021. Maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteet: Arvio päästövähennysmahdollisuuksista. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 7/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 121 s. <https://jukuri.luke.fi/items/bfecff23-476a-4070-a317-63e80fc6c59>

Lehtonen, H. & Rämö, J. 2022. Development towards low carbon and sustainable agriculture in Finland is possible with moderate changes in land use and

- diets. *Sustainability Science* 18, p. 425–439.
<https://doi.org/10.1007/s11625-022-01244-6>
- Lehtonen, H., Huan-Niemi, E. & Niemi, J. 2022. The transition of agriculture to low carbon pathways with regional distributive impacts. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 44: 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.05.002>
- Lehtonen, H., Aro, K., Kaustell, K., Leinonen, I., Luostarinen, S., Niskanen, O., Rasi, S., Suokannas, A. 2024a. Maatalouden ilmastotiekartan päivitetty skenaariot ja arviot päästövähennyksistä vuoteen 2035 ja 2050.
<https://www.mtk.fi/-/vahahiilisyystiekartta2024>
- Lehtonen, H., Ojanen, H., Kekkonen, H., Niskanen, O., Savikko, R., Wejberg, H., Knuuttila, M., Stenberg, L., Niemi, J., Salmivaara, A., Laurila, M. 2024b. Turvepeltojen käytön tiekartta vuoteen 2050. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 89/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 154 s
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-980-2>
- Lenton, T.M., Armstrong McKay, D.I., Loriani, S. ym. (toim.) 2023. The Global Tipping Points Report 2023. Exeterin yliopisto, Exeter, UK. Raportti ladattavissa osoitteesta: <https://global-tipping-points.org/>
- Leskinen, P., Holma, A., Manninen, K., Sinkko, T., Pasanen, K., Rantala, M. & Sokka, L. 2014. Uusiutuvan energian tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset ja -riskit. Kirjallisuuskatsaus ja asiantuntija-arvio. Ympäristöministeriön raportteja 9/2014. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4294-9>
- Lidauer, M. ja Pösö, J. 2020 [diaesitys] Genetiikka avuksi – eläinjalostuksella ympäristöystävällisempiä lehmä.
https://www.luke.fi/sites/default/files/2022-05/Genetiikka_avuksi_Lidauer_ja_Posso.pdf
- Lindroos, T. J., Pursiheimo, E., Sahlberg, V., & Tulkki, V. 2019. A techno-economic assessment of NuScale and DHR-400 reactors in a district heating and cooling grid. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 14(1), 13–24.
<https://doi.org/10.1080/15567249.2019.1595223>
- Lo, M.G.Y., Morgans, C.L., Santika, T., Mumbunan, S., Winarni, N., Supriatna, J., Voigt, M., Davies, Z.G. & Struebig, M.J. 2024. Nickel mining reduced forest cover in Indonesia but had mixed outcomes for well-being. *One Earth* 7(11):2019–2033. ISSN 2590-3322.
<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.010>
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Auri, J., Hyvärinen, J., Hyvönen, E., Lerssi, J., Nieminen, T. M., Nuottimäki, K., Turunen, R., Ukonmaanaho, L. 2023. Opas mustaliuskeiden ympäristövaikutusten arviointiin ja hallintaan.

Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 81/2023, 55 s.
https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/81_2023.pdf

- Luke 2023. Halko- ja klapikauppa kasvoi neljänneksen vuonna 2022. Luonnonvarakeskus. Uutinen 23.3.2023.
<https://www.luke.fi/fi/uutiset/halko-ja-klapikauppa-kasvoi-neljanneksen-vuonna-2022>
- Luke 2023a. MELA Tulospalvelu, VMI12–13 (mittausvuodet 2017–2021) [verkkojulkaisu]. Luonnonvarakeskus [viitattu 12.5.2025].
<http://www.luke.fi/mela-metsalaskelmat>
- Luke 2024b. Metsänhoito- ja metsänparannustyöt 2023. Saatavilla:
<https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsanhoito-ja-metsanparannustyot/metsanhoito-ja-metsanparannustyot-2023>
- Luke 2025. Hakkuukertymä omistajaryhmittäin koko maassa 1985- muuttujina Tieto, Vuosi ja Puutavaralaji.
https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_met_hakker/0200_hakker.px/table/tableViewLayout2/
- Luonnonsuojelulaki. 9/2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2023/20230009>
- Luostarinen, S., Tampio, E., Lehtoranta, S., Valve, H., Laakso, J., Rasi, S., Pyykkönen, V., Markkanen, J., Heikkinen, J., Haapala, H., Winqvist, E., Lång, K., Timonen, K., Silfver, T. 2023. Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:32. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-479-8>
- LVM 2018. Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045. Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 13/2018. ISBN 978-952-243-559-0
- LVM 2020. Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:18.
- LVM 2021. Fossiilittoman liikenteen tiekartta. Valtioneuvoston periaatepäätös kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämisestä. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2021:15.
- Lyytimäki, J. 2020. Ilmastonmuutos isosti otsikoissa – kirittääkö uutisointi kestävyysmurrokseen? Yhteiskuntapolitiikka 85:2.
https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/139434/YP2002_Lyytim%c3%a4ki.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Lång, K., Aro, L., Assmuth, A., Haltia, E., Hellsten, S., Larmola, T., Lempinen, H., Lindfors, L., Lohila, A., Miettinen, A., Minkkinen, K., Nieminen, M., Ollikainen, M., Ojanen, P., Sarkkola, S., Sorvali, J., Seppälä, J., Tolvanen, A., Vainio, A., Wall, A. & Vesala T. 2022. Turvemaiden käytön

vaihtoehdot hiilineutraalissa Suomessa. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2022. <https://doi.org/10.31885/9789527457115>

- Lång, K., Hakola, S., Iho, A., Kekkonen, H., Miettinen, A., Niskanen, O., Ojanen, H. ja Wejberg, H. 2023. Turvepeltojen kosteikko-ohjelma: Ehdotus kosteikkoviljelyyn varatun rahoituksen käytöstä vuosina 2023–2025. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 12/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 43 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-616-0>
- 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., Viitanen, J., Vikfors, S. & Wall, A. 2021. Hiilineutraali Suomi 2035: Maankäyttö- ja maataloussektorin skenaariot. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:63. Valtioneuvoston kanslia. Helsinki. 102 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-263-3>
- Maciel, L. B. B., Viola, L., de Queiróz Lamas, W., & Silveira, J. L. 2023. Environmental studies of green hydrogen production by electrolytic process: A comparison of the use of electricity from solar PV, wind energy, and hydroelectric plants. International Journal of Hydrogen Energy, 48(93):36584-36604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.334>
- Martikainen, S. 2018. Kannattaako liharoturisteytys lypsykarjassa? Opinnäytetyö. Savonia ammattikorkeakoulu. 36 s.
- Marttunen, M., Rantala, T., Kajanus, M., Turunen, V., Virkkumaa, S., Häkkinen, M., Seppälä, P. & Räsänen, Aleksi. 2024. Monitavoitteinen valuma-alue suunnittelu: Yhteenveto ohjeista, oppaista, tietotuotteista ja hankkeista. Suomen ympäristökeskuksen julkaisuja 2024:17. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5665-6>
- Material Economics. 2018. The circular economy – A powerful force for climate mitigation (p. 176). Material Economics Sverige AB. <https://materialeconomics.com/publications/publication/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation>
- Material Economics. 2019. Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry. Material Economics Sverige AB. <https://materialeconomics.com/publications/publication/industrial-transformation-2050>
- Mattila, H.-P., Hudd, H. & Zevenhoven, R. 2014. Cradle-to-gate life cycle assessment of precipitated calcium carbonate production from steel converter slag. Journal of Cleaner Production 84: 611–618. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005411?via%3Dihub>

MEA, Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland 2024. Finland's Integrated National Energy and Climate Plan Update. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment 2024:30. Saatavilla: [Finland's Integrated National Energy and Climate Plan : Update](#)

Metsähallitus 2025. Haettu 13.5.2025 osoitteesta:
<https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/merituulivoimassa-suuret-mahdollisuudet/merituulivoiman-ymparistovaikutukset/>

Metsänhoidon suositukset. 2025. Hoidettujen kasvatusmetsien harvennusmallit - Pidennetty kiertoaika [verkojulkaisu]. Tapio [viitattu 6.2.2025].
<https://metsanhoidonsuositukset.fi/fi/hoidettujen-kasvatusmetsien-harvennusmallit>

Miettinen, A., Aakkula, J., Koikkalainen, K., Lehtonen, H., Luostarinen, S., Myllykangas, J-P., Sairanen, A. & Silfver, T. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035. Maatalouden lisätoimenpiteiden ja ruokavaliomuutoksen päästövähennysvaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 73/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 69 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-500-2>

MMM 2025a. Metsien kasvun ja hiilinielujen vahvistamisen toimenpidepaketti. Muistio 3.3.2025.
https://mmm.fi/documents/1410837/0/Metsien%20kasvupaketti_03032025_luovutettu.pdf/a019eeeb-38dc-7615-42ba-cb9d14112b09/Metsien%20kasvupaketti_03032025_luovutettu.pdf?t=1742979457200

Moilanen, P., Lapp, T., Niinikoski, M., Blomqvist, P. & Rinta-Piirto, J. 2022. Valtakunnalliset liikenne-ennusteet. Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä 6/2022. Saatavilla:
<https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/VLE%202022.pdf>

Mosley, F., Niemi, J., Soimakallio, S. 2025. Applying the greenhouse gas inventory calculation approach to predict forest carbon sink development. Carbon balance and management. 20 (16).

Mäkinen, K., Palmu, J-P., Teeriaho, J., Rönty, H., Rauhaniemi, T., Jarva, J., 2007. Valtakunnallisesti arvokkaat moreenimuodostumat. Suomen ympäristö 14/2007, 120 s.

Mäkinen, K., Teeriaho, J., Rönty, H., Rauhaniemi, T., Sahala, L., 2011. Valtakunnallisesti arvokkaat tuuli- ja rantakerrostumat. Suomen ympäristö 32/2011, 185 s.

Mäkelä, A., Minunno, F., Kujala, H., Kosenius, A.-K., Heikkinen, R.K., Junttila, V., Peltoniemi, M. and Forsius, M. 2023. Effect of forest management

- choices on carbon sequestration and biodiversity at national scale. *Ambio* 52: 1737–1756. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01899-0>
- Nissinen, A. & Savolainen, H. (toim.) 2019. Julkisten hankintojen ja kotitalouksien kulutuksen hiilijalanjälki ja luonnonvarojen käyttö. ENVIMAT-mallinnuksen tuloksia. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 15/2019. <http://hdl.handle.net/10138/300737>
- Nissinen, A., Seppälä, J. & Heinonen T. 2022. Make carbon footprints available – And it is not just one value. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 3, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100023>
- Nurmio, K. & Pakarinen, H. 2024. Tuulivoimapotentiaali Suomessa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 10/2024. <http://hdl.handle.net/10138/573122>
- OECD 2019. Interconnected Supply Chains: A Comprehensive Look at Due Diligence Challenges and Opportunities Sourcing Cobalt and Copper from the Democratic Republic of the Congo. https://www.oecd.org/en/publications/interconnected-supply-chains_576804e7-en.html
- Ohtonen, K., Savolahti, M., Tissari, J. & Naumanen, S. 2024. Puunpolttotapakysely 2024. Ympäristöministeriön julkaisuja 2024:34. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-379-9>
- Olczak, P. & Surma, T. 2023. Energy Productivity Potential of Offshore Wind in Poland and Cooperation with Onshore Wind Farm. *Applied Sciences*. 13(7):4258. <http://dx.doi.org/10.3390/app13074258>
- Ollila, P., Vikfors, S., Kilpeläinen, H., Aakkula, J., Hirvelä, H., Härkönen, K., Koikkalainen, K., Miettinen, A., Myllykangas, J.-P., Silfver, T. & Wall, A. 2022. Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman mukainen skenaariotarkastelu vuoteen 2040. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 54/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 24 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-460-9>
- Osman, A. I., Nasr, M., Mohamed, A. R., Abdelhaleem, A., Ayati, A., Farghali, M., Al-Muhtaseb, A.H., Al-Fatesh, A.S. & Rooney, D. W. 2024. Life cycle assessment of hydrogen production, storage, and utilization toward sustainability. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 13(3):e526. <https://doi.org/10.1002/wene.526>
- Paloneva, M. & Takamäki, S. 2020. Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista. Työ- ja elinkeinoministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162494>
- Pasanen, A., Panssar, M., Meller, K., Yrjönmäki, S., Pihlamo, J. & Kaarna, U. 2025. Vihreän siirtymän energiaratkaisujen luontovaikutukset. One

Planet Oy. <https://www.oneplanet.fi/s/Selvitys-Suomen-tuulivoiman-ja-aurinkovoiman-luontovaikutukset.pdf>

Pekkonen, M., Lumiaro, R., Pappila, M., Varumo, L., Vuori, K-M., Koivikko, R., Koljonen, S., Pihlainen, S., Ahola A. & Salo, P. 2025. Ekologinen kompensaatio Suomessa: Kokeilut ja käytäntöjen kehittäminen luonnonsuojelulain uudistuksen yhteydessä. Suomen ympäristökeskuksen julkaisuja 4/2025.
<http://hdl.handle.net/10138/594291>

Peltonen, L., Donner-Amnell, J. & Nokelainen, S. 2024. Tuulivoiman hyväksyttävyyden nykytila ja näkymät Suomessa. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Social Sciences and Business Studies No 21. Itä-Suomen yliopisto.
<https://erepo.uef.fi/handle/123456789/31645>

Pihlainen, S., Pohjola, J., Assmuth, A., Hyyrynen, M., Kuussaari, M., Pappila, M., Pekkonen, M., Piironen, T., Punttila, P. & Valve, H. 2024. Luonnon monimuotoisuuteen vaikuttavat ohjauskeinot: Katsaus biodiversiteetin kannalta haitallisiin ja hyödyllisiin tukiin sekä muihin ohjauskeinoihin Suomessa. Suomen ympäristökeskuksen julkaisuja 32/2024.
<http://hdl.handle.net/10138/587276>

Pitkänen, K., Karppinen, T.K.M., Kylmänen, N., Kyynäräinen, A., Myllymaa, T. 2024. Kiertotalousbarometrit 2023: Kiertotalous suomalaisten arjessa ja yritysten toiminnassa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 38/2023.
<http://hdl.handle.net/10138/569826>

Pohjolainen, P., Vinnari, M., Roitto, M., Ala-Harja, V., Järviö, N. & Tuomisto, H. 2023. Kasvipohjaiset ja solumaatalouden tuotteet Suomen ruokajärjestelmän murroksessa. Kohti vuotta 2050. Sitran selvityksiä 232. ISBN 978-952-347-328-7 (PDF) www.sitra.fi

Pörtner, H.O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes, D., Burows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P. A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman, E., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A. P. F., Popp, A., ReyesGarcía, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y. J., Sintayehu, D. W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A.L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D.C., Rogers, A.D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N., Ngo, H.T. 2021. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC.
[DOI:10.5281/zenodo.4782538](https://doi.org/10.5281/zenodo.4782538)

Pöyry 2020. Teknologiaeteollisuuden vähähiilitiekartta, raportti – vaihe 2.

- P2X 2025. Finland's first green hydrogen plant was inaugurated in Harjavalta. 26.3.2025. <https://p2x.fi/en/finlands-first-green-hydrogen-plant-was-inaugurated-in-harjavalta/>
- Rajagopal, D., & Plevin, R. J. 2013. Implications of market-mediated emissions and uncertainty for biofuel policies. *Energy Policy* 56: 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.076>
- RESCUE 2019. Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas Neutrality – RESCUE. Summary Report. https://www.umweltbundesamt.de/en/rescue/summary_report
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S.E., Donges, J.F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Weber, L. & Rockström, J. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances* 9, 37. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rintala, J., 2024. Arvokkaiden harju- ja kallioalueiden maankäyttö. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 29/2024, 76 s.
- Ritola, R., Kulovuori, S., Stojiljkovic, A. & Karvosenoja, N. 2021. Katupölyn lähteet, päästövähennyskeinot ja ilmanlaatuvaikutukset - KALPA3-tutkimushankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28/2021. <http://hdl.handle.net/10138/329698>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, J., Nykvist, B., DeWit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J. 2009. *Nature* 461: 472-475. <https://www.nature.com/articles/461472a>
- Ruiz Castello, P., Nijs, W., Tarvydas, D., Sgobbi, A., Zucker, A., Pilli, R., Jonsson, K., Camia, A., Thiel, C., Hoyer-Klick, C., Dalla Longa, F., Kober, T., Badger, J., Volker, P., Elbersen, B., Brosowski, A. & Thrän, D. 2019. ENSPRESO – an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. *Energy Strategy Reviews*. ISSN 2211-467X, 26, p. 100379, JRC112858. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC112858>
- Ruokamo, E., Savolainen, H., Seppälä, J., Sironen, S., Räisänen, M., Auvinen, A.-P., & Antikainen, R. 2021. Kiertotalous vähähiilisuuden edistäjänä ja luonnon monimuotoisuuden turvaajana. Ympäristöministeriön julkaisuja 6/2021. Ympäristöministeriö. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-205-1>

- Ruokamo, E., Savolainen, H., Seppälä, J., Sironen, S., Räisänen, M., & Auvinen, A.-P. 2023. Exploring the potential of circular economy to mitigate pressures on biodiversity. *Global Environmental Change*, 78, 102625. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102625>
- Rybach L. (2007). Geothermal sustainability. Proceedings European Geothermal Congress 2007 Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.
- Rytönen, A.-M., Ahopelto, L., Helkimo, J., Olin, S., Keto, A., Leinonen, A. & Häggblom, O. 2024. Valuma-aluesuunnittelun tiekartta vuoteen 2030. Valtioneuvoston julkaisuja 2024:6. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-727-0>
- Räsänen, A., Albrecht, E., Annala, M., Aro, L., Laine, A.M., Maanavilja, L., Mustajoki, J., Ronkanen, A.-K., Silvan, N., Tarvainen, T. & Tolvanen, A. 2023. After-use of peat extraction sites – A systematic review of biodiversity, climate, hydrological and social impacts. *Science of The Total Environment*, Volume 882, 2023, 163583, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163583>.
- Salo, M., Heiskanen, E., Heikkinen, M., Heinonen, T., Jylhä, H., Kaljonen, M., Kautto, P., Lähteenmäki-Uutela, A., Matschoss, K., Meriläinen, T., Nissinen, A., Pyrhönen, T., Saarinen, M., Salminen, J., Salmivaara, L., Savolainen, H., Seppälä, J., Springare, S., Turunen, T., Vainio, A. & Virkkunen, H. 2023. Ohjauskeinoja kotitalouksien kulutuksen hiilijalanjäljen pienentämiseen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:47. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-424-8>
- Savolahti M. 2020. Climate and Health Impacts of Residential Wood Combustion in Finland. Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS, 32/2020. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-8966-9>
- Savolahti M., Karvosenoja N., Tissari J., Kupiainen K., Sippula O., Jokiniemi J. 2016. Black carbon and fine particle emissions in Finnish residential wood combustion: Emission projections, reduction measures and the impact of combustion practices. *Atmospheric Environment* 140:495–505. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.023>
- Savolahti M., Lehtomäki H., Karvosenoja N., Paunu V.-V., Korhonen A., Kukkonen J., Kupiainen K., Kangas L., Hänninen O., Karppinen A. 2019. Residential wood combustion in Finland: PM2.5 emissions and health impacts with and without abatement measures. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 2920. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162920>
- Savolainen, H., Niemistö, J., Heikkinen, M., Seppälä, J., Springare, S., Salminen, J., Savolahti, M., Soimakallio, S., Ruokamo, E., Koljonen, T., Harlin, A., Keränen, J., Vainio, T., Vainio-Kaila, T., Kivikytö-Reponen, P., Orko, I., Karhu, M., Lehtonen, H., Joutsjoki, V., Niemeläinen, O., Kivinen, M.,

- Eerola, T., Heino, N., Kaariaho, T. (2024). Suomen kansantalouden materiaaliavirrat ja niiden vaikutukset: Toteutunut kehitys ja kiertotalouden skenaariot vuodelle 2035. Valtioneuvoston julkaisuja 2024:8.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-759-1>
- Scheele, F., de Haan, E. & Kiezebrink, V. 2016. Cobalt blues Environmental pollution and human rights violations in Katanga's copper and cobalt mines. Centre for Research on Multinational Corporations.
https://www.researchgate.net/publication/346528037_Cobalt_blues_Environmental_pollution_and_human_rights_violations_in_Katanga's_copper_and_cobalt_mines
- Scholten, D., Bazilian, M., Overland, I. & Westphal, K. 2020. The geopolitics of renewables: New board, new game. Energy Policy 138:111059.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111059>
- Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P. & Wiser, R. 2014. Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Schöll, E. M. & Nopp-Mayr, U. (2021). Impact of wind power plants on mammalian and avian wildlife species in shrub- and woodlands. Biological conservation. 256: 109037. 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109037>
- Searle, S. & Malins, C. 2015. A reassessment of global bioenergy potential in 2050. GCB Bio-energy, 7(2), 328–336.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12141>
- Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen, A., Katajajuuri, J.-M., Härmä, T., Korhonen, M.-R., Saarinen, M., & Virtanen, Y. 2011. An assessment of greenhouse gas emissions and material flows caused by the Finnish economy using the ENVIMAT model. Journal of Cleaner Production, 19(16), 1833–1841.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.021>
- Shields, M., Beiter, P., Nunemaker, J., Cooperman, A. & Duffy, P. 2021. Impacts of turbine and plant upsizing on the levelized cost of energy for offshore wind. Applied Energy, Volume 298, 2021, 117189. ISSN 0306-2619.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117189>

- Sihvonen, V., Ollila, I., Jaanto, J., Grönman, A., Honkapuro, S., Riikonen, J. & Price, A. 2024. Role of power-to-heat and thermal energy storage in decarbonization of district heating. *Energy* 305:132372.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132372>
- Silfver, T., Aakkula, J., Haakana, M., Haikarainen, S., Hirvelä, H., Hynynen, J., Mikola, J., Mutanen, A., Myllykangas, J.-P., Ollila, P., Salminen, H., Tuomainen, T., Viitanen, J., Vikfors, S. & Wall, A. 2024. Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman skenaariotarkastelun päivitys. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 4/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 37 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-869-0>
- Silver, A. & Tuokko, K. 2024. Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista 2024. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2024:45.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-829-5>
- Sipilä, E. & Lottonen, J. 2024. Selvitys hallitusohjelman uusiutuvien polttoaineiden jakeluvelvoitetta koskevien kirjausten vaikutuksista sekä RED III-direktiivin kansallisesta toimeenpanosta. VN/26504/2023. Saatavilla: https://tem.fi/documents/1410877/196402993/Jakeluvelvoiteselvitys_HO_REDIII_12022024_AFRY.pdf/208d520a-0daf-5700-8522-ee119c64ed10/Jakeluvelvoiteselvitys_HO_REDIII_12022024_AFRY.pdf?t=1707744320788
- Sitra 2016. Kiertotalouden tiekartta Suomelle 2016–2025.
<https://www.sitra.fi/hankkeet/kierrolla-karkeen-suomen-tiekartta-kiertotalouteen-2016-2025/>
- Sitra 2019. Kriittinen siirto – kiertotalouden tiekartta 2.0.
<https://www.sitra.fi/hankkeet/kriittinen-siirto-kiertotalouden-tiekartta-2/>
- Sivonen, M.H. & Kivimaa, P. 2025. Interrelations between security and the zero-carbon energy transition in the Finnish and Norwegian Arctic. *Energy Research & Social Science* 119:103841.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103841>
- Soimakallio, S., Antikainen, R. & Thun, R. 2009. Assessing the sustainability of liquid biofuels from evolving technologies. A Finnish Approach. Technical Research Centre of Finland (VTT) Research Notes, 2482.
<https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2009/T2482.pdf>
- Soimakallio, S. & Koponen, K. 2011. How to ensure greenhouse gas emission reductions by increasing the use of biofuels? Suitability of the European Union sustainability criteria. *Biomass and Bioenergy*, Volume 35, Issue 8, 2011, Pages 3504-3513. ISSN 0961-9534.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.041>
- Soimakallio S., Hildén M., Lanki T., Eskelinen H., Karvosenoja N., Kuusipalo H., Lepistö A., Mattila T., Mela H., Nissinen A., Ristimäki M., Rehunen A., Repo A., Salonen R., Savolahti M., Seppälä J., Tiittanen P. & Virtanen S.

2017. Energia- ja ilmastostrategian ja keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman ympäristövaikutusten arviointi. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 59/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-444-3>
- Soimakallio, S., Tikkakoski, P., Niemistö, J., Savolahti, M., Rehunen, A., Seppälä, J. & Hildén, M. 2021. Hiilineutraali Suomi 2035 - Kansallisen ilmasto- ja energiastrategian vaikutusten arviointi. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, 2021:64. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163642/VNTEAS_2021_64.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sojamo, S., Salminen, J., Puharinen, S.-T., Belinskij, A., Halonen, M., Heikinheimo, E., Saari, P., Airaksinen, J., Illman, J., Behm, K., Reinikainen, A. & Usva, K. Vesivastuullinen Suomi 2030 – parhaat käytänteet, ohjauskeinot ja toimintamallit. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:26. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-310-4>
- Sokka, L., Kirppu, H. & Leppänen, J. 2024. Evaluation of Life Cycle CO₂ Emissions for the LDR-50 Nuclear District Heating Reactor. *Energies* 17 (13), 3250. <https://doi.org/10.3390/en17133250>
- Solismaa, L. 2009. Suomen merkittävimpien sedimenttikivimuodostumien CCS-soveltuvuus. Suomi: Kuopio. Geologian tutkimuskeskus GTK. Itä-Suomen Yksikkö, K21.42/2009/56.
- Steady Energy 2025. Steady Energy to build small nuclear pilot plant inside a former coal plant in central Helsinki. 19.5.2025. <https://www.steadyenergy.com/news-article/steady-energy-to-build-small-nuclear-pilot-plant-inside-a-former-coal-plant-in-central-helsinki>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sörlin, S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* **347**, 1259855. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855>
- STY 2023. Tuulivoima Suomessa 2023. Suomen Tuulivoimayhdistys ry 31.12.2023. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-3.pdf
- Suomen ilmastopaneeli 2025. Suomen hiilineutraaliuspolku. Arvio hiilineutraaliuden saavuttamisesta ja sen keinoista. Suomen ilmastopaneelin julkaisuja 1/2025. <https://ilmastopaneeli.fi/hallinta/wp-content/uploads/2025/04/Ilmastopaneelin-julkaisuja-1-2025-Suomen-hiilineutraaliuspolku-Arvio-hiilineutraaliuden-saavuttamisesta-ja-sen-keinoista.pdf>

- Suomen ilmastopaneeli ja Suomen ympäristökeskus 2023. Autokalkulaattori.
<https://www.ilmastopaneeli.fi/autokalkulaattori/>
- Suomen uusiutuvat 2024a. Tuulivoima. Hankkeet ja voimat Suomessa.
<https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/hankkeet-ja-voimat-suomessa/>
- Suomen uusiutuvat 2024b. Merituulivoiman ympäristönäkökulmat.
<https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/merituulivoima/merituulivoiman-ymparistonakokulmat/>
- Suomen uusiutuvat 2025a. Aurinkovoimatilastot 2024.
<https://suomenuusiutuvat.fi/aurinkovoimatilastot-2024/>
- Suomen uusiutuvat 2025b. Aurinkovoimahankkeet ja voimat Suomessa.
<https://suomenuusiutuvat.fi/aurinkovoima/aurinkovoimahankkeet-ja-voimat-suomessa/>
- Suomen uusiutuvat 2025c. Suunnittelussa olevat hankkeet. Viimeksi katsottu 12.6.2025. <https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/hankkeet-ja-voimat-suomessa/suunnittelussa-olevat-hankkeet/>
- Suomen uusiutuvat 2025d. Suunnitteilla olevat tuuli- ja aurinkovoimahankkeet.
Saatavilla: <https://suomenuusiutuvat.fi/>
- Suomen ympäristökeskus 2025. Suomen ympäristökeskuksen asiantuntijalausunto asiaan: HE 37/2025 vp Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista annetun lain muuttamisesta ja uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä annetun lain 7 §:n 7 momentin kumoamisesta. Talousvaliokunta 8.5.2025.
- Syri, S., Vihma, A., Airaksinen, M., Hast, A., Järvelä, M., Ollikainen, M., Savolainen, I., Seppälä, J. & Soimakallio, S. 2013. Kansainvälisen ja EU:n ilmastopolitiikan ajankohtaisia teemoja. Suomen ilmastopaneelin raportti 6/2013. https://ilmastopaneeli.fi/hallinta/wp-content/uploads/2024/07/ilmastopaneelin_raportti-6_2013.pdf
- Svensk Vindenergi, 2024. Pilotprojekt: Vetenskapligt baserade mål för naturen. Guide för att förstå och bedöma miljöpåverkan från landbaserad vindkraft, enligt Science Based Targets for Nature. Haettu 13.5.2025 osoitteesta: https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2024/02/Pilotprojekt_SBT_for_Nature_Svensk_Vindenergi-1.pdf
- Teir, S., Aatos, S., Kontinen, A., Zevenhoven, R. & Isomäki, O.-P. 2006. Silikaattimineraalien karbonoiminen hiilidioksidin loppusijoitusmenetelmänä Suomen oloissa. Vuorimiesyhdistys: Materia 1/2006 s. 40–46.

- TEM 2021. Kansallinen akkustrategia 2025. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2021:2. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162684>
- TEM 2022. Oikeudenmukaisen siirtymän rahasto (JTF). [Oikeudenmukaisen siirtymän rahasto \(JTF\) | Rakennerahastot](#)
- Tiitu, M., Helminen, V., Järvenpää, E., Härmä, P., Hatunen, S. Rehunen, A. 2015. Rakennetun alueen pinta-alan ennakointi – paikkatietoaineistojen ja -menetelmien hyödyntäminen rakennetun alueen muutosten laskennassa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28/2015. <http://hdl.handle.net/10138/155615Traficom> 2023a. Ajoneuvojen avoin data. Saatavilla: <https://tieto.traficom.fi/fi/tietotraficom/avoin-data?toggle=Ajoneuvojen%20avoin%20data>
- Tilastokeskus 2021. Väestöennuste 2021-2070. Saatavilla: https://stat.fi/til/vaenn/2021/vaenn_2021_2021-09-30_fi.pdf
- Tilastokeskus 2023. Kiertotaloustoiminnan indikaattorit. <https://www.stat.fi/tup/kiertotalous/kiertotalousliiketoiminnan-indikaattorit.html>
- Tilastokeskus 2024. Väestöennuste. ISSN=1798–5137. Helsinki. <https://stat.fi/tilasto/vaenn>
- Tilastokeskus 2025a. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa, 1990–2023. https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_khki/statfin_khki_pxt_138v.px
- Tilastokeskus 2025b. Sähkön hankinta ja kokonaiskulutus, 1960–2023. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehk/statfin_ehk_pxt_12sv.px/
- Tilastokeskus 2025c. Energia 2022 -taulukkopalvelu. Tilastokeskus, julkaisujen taulukkopalvelut.
- Tilastokeskus 2025d. Kasvihuonekaasuinventaarion 15.4.2025 YK-lähetys, kansallinen inventaarioraportti NID. Saatavilla: https://stat.fi/media/uploads/tup/khkinv/fi_nid_un_2023_2025-04-15.pdf
- Tissari, J., Väättäinen, S., Leskinen, J., Savolahti, M., Lamberg, H., Kortelainen, M., Karvosenoja, N. & Sippula, O. 2019. Fine particle emissions from sauna stoves: effects of combustion appliance and fuel, and implications for the Finnish emission inventory. Atmosphere 10:775, <https://doi.org/10.3390/atmos10120775>.
- TM 2025. Tekniikan maailma. Kitkarenkaat yleistyvät Suomessa nopeasti. 7.2.2025. Viitattu 23.5.2025. <https://tekniikanmaailma.fi/kitkarenkaat-yleistyvat-suomessa-nopeasti/>

- Toivanen, M. 2024. Quantitative geodiversity assessment in biodiversity investigations. *Nordia Geographical Publications*, 53(2), 1–70.
<https://doi.org/10.30671/nordia.147478>
- Toivonen, L. 2021. Five important questions about the environmental impacts of increased digital use. Saatavilla: [Five important questions about the environmental impacts of increased digital use - Sitra](#).
- Tolvanen, A., Holttinen, H., Laine-Petäjäkangas, A., Tokola, T., Pouta, E., Antila, M., Heinonen, T., Jokikokko, M., Karlsson, T., Koponen, K., Lampela, M., Lindroos, T., Maanavilja, L., Mäntymaa, E., Rana, P., Routavaara, H., Selkimäki, M., & Juutinen, A. 2025. Synteesiraportti: Kuinka tuulivoima sovitetaan yhteen metsien ja soiden käytön kanssa? Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 29/2025. Luonnonvarakeskus. Helsinki.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-049-7>
- Tolvanen, A., Routavaara, H., Jokikokko, M. & Rana, P. 2023 How far are birds, bats, and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – A systematic review. *Biological Conservation* 288:110382. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110382>.
- Traficom 2023. Henkilöliikennetutkimus 2021. Suomalaisten liikkuminen. Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä 1/2023.
https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/HLT_2021_p%C3%A4%C3%A4raportti.pdf
- Traficom 2024a. Romutuspalkkiokampanja vähäpäästöisen käytetyn auton hankintaan – vaikutusarvio. Muistio, 11.10.2024.
- Traficom 2024b. Kestävän liikenteen edistäminen. Vaikutusarvio. Muistio, 7.11.2024.
- Traficom 2024c. Sähkö-, kaasu- ja vetykäyttöisten kuorma-autojen hankintatuet – vaikutusarvio.
- Traficom 2024d. Valtakunnalliset liikenne-ennusteet 2024.
https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/VLE%202024_0.pdf
- Traficom 2024e. Liikennejärjestelmän ympäristöllinen kestävyys.
<https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikennejarjestelman-ymparistollinen-kestavyys>
- Traficom 2025a. Ajoneuvokannan tilastot.
<https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot>
- Traficom 2025b. Henkilöautojen ensirekisteröinnit 2016–2025.
https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi_Ensirekisteroinnit/?tablist=true

- Traficom 2025c. Henkilöliikennetutkimus syksy 2024. Suomalaisten liikkuminen. Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä 20/2025.
https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/HLT_syksy2024_raportti.pdf
- Tukes 2025a. Ajankohtaiskatsaus: malminetsintä ja kaivosteollisuus 2024. Terho Liikamaa 28.3.2025.
https://tukes.fi/documents/5470659/6373256/Ajankohtaiskatsaus_Malminetsint%C3%A4%20ja%20kaivosteollisuus%202024.pdf/d0d6c8ab-f381-8bc9-34e5-4b8e230c7d0d/Ajankohtaiskatsaus_Malminetsint%C3%A4%20ja%20kaivosteollisuus%202024.pdf?t=174308331383
- Tukes 2025b. Kaivokset, malminetsintä ja kullanhuuhtonta. Verkkosivusto. Vierailtu 19.6.2025. <https://tukes.fi/teollisuus/kaivos-malminetsinta-ja-kullanhuuhtonta/>
- Turunen, A. W., Tiittanen, P., Yli-Tuomi, T., Taimisto, P. & Lanki, T. 2021. Symptoms intuitively associated with wind turbine infrasound. *Environmental Research*. 192: 110360. 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110360>
- Turunen, J. & Valpola, S. 2020 The influence of anthropogenic land use on Finnish peatland area and carbon stores 1950–2015. *Mires and Peat*, 26, 26, 27pp. (Online: <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map26/map2626.php>);
doi: [10.19189/MaP.2019.GDC.StA.1870](https://doi.org/10.19189/MaP.2019.GDC.StA.1870)
- UNECE 2021. United Nations Economic Commission for Europe. Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options.
https://unece.org/sites/default/files/2021-11/LCA_final.pdf
- UNEP 2016. United Nations Environmental Programme. Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production. Report of the International Resource Panel. Hertwich, E. G., Aloisi de Larderel, J., Arvesen, A., Bayer, P., Bergesen, J., Bouman, E., Gibon, T., Heath, G, Peña, C., Purohit, P., Ramirez, A., & Suh, S. (eds.). <https://www.resourcepanel.org/reports/green-energy-choices-benefits-risks-and-trade-offs-low-carbon-technologies-electricity>
- UNEP 2024. United Nations Environment Programme. Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes. International Resource Panel. Nairobi.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901>
- USGS 2025. Mineral Commodity Summaries 2025. U.S. Geological Survey. U.S. Department of the Interior.
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>

- Vaden, T. & Majava, A. 2023. Energiamurros ja metsäpinta-alan rooli suomalaisen yhteiskunnan aineenvaihdunnassa. *Alue ja Ympäristö*, 51(2), 107–123. <https://doi.org/10.30663/ay.121616>
- Vainio, A. & Kojo, M. 2024. Pienydinvoima oikeudenmukaisessa energiasiirtymässä. Teoksessa Korhonen, J.M. (toim.). Oikeudenmukainen siirtymä Suomessa 2025. Helsinki, Kalevi Sorsa - säätiö. s. 297-333. <https://sorsafoundation.fi/wp-content/uploads/oikeudenmukainen-siirtyma-suomessa-2025-raportti.pdf>
- Vainio A., Käyhkö J., Loivaranta T., Lundberg P. & Honkanen O. 2023. Kansalaisten kokemukset Suomen ilmastopolitiikan oikeudenmukaisuudesta. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2023. <http://hdl.handle.net/10138/359158>
- Vainio, T. 2025. Asuntotuotantotarve 2025–2045. VTT Technology 435. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2025/T435.pdf>
- Valtakunnan metsien 11. inventointi (VMI11). 2013. Maastotyön ohjeet 2013. Koko Suomi ml. Ahvenanmaa. Luonnonvarakeskus. 191 s.
- Valtakunnan metsien 12. inventointi (VMI12), 2018. Maastotyön ohjeet 2018. Koko Suomi ml. Ahvenanmaa. Luonnonvarakeskus. 166 s.
- Valtakunnan metsien 13. inventointi (VMI13). 2021. Maastotyön ohjeet 2021. Luonnonvarakeskus. 163 s.
- Valtioneuvosto 2023a. Vahva ja välittävä Suomi: Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023. Helsinki: Valtioneuvosto. Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-763-8>
- Valtioneuvosto 2023b. Vesivastuullisuuden kansallinen edistäminen. Toimintasuunnitelma 2023–2025. Valtioneuvoston julkaisuja 2023:48. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-554-2>
- Valtioneuvosto 2024. Työryhmä valmistelemaan uutta kiertotalouslakia. Tiedote 28.8.2024. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/tyoryhma-valmistelemaan-uutta-kiertotalouslakia>
- Valtioneuvosto 2025a. EU:n strategisen hankkeen asema kuudelle Suomessa sijaitsevalle hankkeelle. Tiedote 25.3.2025. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/eu-n-strategisen-hankkeen-asema-kuudelle-suomessa-sijaitsevalle-hankkeelle>
- Valtioneuvosto 2025b. Datakeskusten ja kaivosten verotukea ehdotetaan poistettavaksi. Tiedote 10.4.2025. <https://valtioneuvosto.fi/-/10623/datakeskusten-ja-kaivosten-verotukea-ehdotetaan-poistettavaksi>

- Vasara, H., Pokki, J., Långbacka, B. & Kivinen, M. 2023. Kaivosalan toimialaraportti. TEM toimialaraportit 2023:4. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-597-3>
- Vassinen, H., Järvinen, K., Auvinen, J., Aalto, L., Kallunki, J., Laine, A., Pokela, P. 2024. Teknologiateollisuuden vähähiilisyiden tiekartta. Tiivistelmä 3.6.2024. Gaia-consulting. Pdf-raportti saatavilla: [Teknologiateollisuus vähähiilisyystiekartta 2024 - Tiivistelmä](#)
- Vihavainen, P., Saari, P., Länsisalo, E., Tkachenko, E., Jaatinen, K., Väisänen, A., Lantta, E-M., Lehtoranta, I., Irrmann, L., Huhtanen, S., Semkin, N., Peltoniemi, M., Bonn, T., Nurminen-Piirainen, M. & Pihlajasaari, M. 2024. Merituulivoiman edistäminen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:4. <https://tietokayttoon.fi/julkaisut/raportti?pubid=URN:ISBN:978-952-383-063-9>
- Venmans, F., Ellis, J. & Nachtigall, D. 2020. Carbon pricing and competitiveness: are they at odds? Climate Policy, 20(9), 1070–1091. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1805291>
- Verde, S.F. 2020. The impact of the EU emissions trading system on competitiveness and carbon leakage: the econometric evidence. Journal of economic surveys, 34(2), 320–343. <https://doi.org/10.1111/joes.12356>
- Verkerk, P.J., Mavsar, R., Giergiczny, M. Lindner, M., Edwards, D. & Schelhaas, M.J. 2014. Assessing impacts of intensified biomass production and biodiversity protection on ecosystem services provided by European forests. Ecosystem Services, 9:155–165. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.004>
- Vero, Verohallinnon tilastotietokanta 2025. Valmisteverot verokausittain, verokaudesta tammikuu 2021 alkaen. Saatavilla: https://vero2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/Vero/Vero_Valmistevero/ F
- Vestas 2024. Material use in Vestas turbines. https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/environment/2024_04_Material-Use-Brochure_Vestas.pdf.coredownload.inline.pdf
- Virtanen, E.A., Lappalainen, J., Nurmi, M., Viitasalo, M., Tikanmäki, M., Heinonen, J., Atlaskin, E., Kallasvuori, M., Tikkanen, H. & Moilanen, A. 2022. Balancing profitability of energy production, societal impacts and biodiversity in offshore wind farm design. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 158, April 2022, 112087. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.058>.
- VM 2024. Taloudellinen katsaus Syksy 2024. Valtiovarainministeriön julkaisuja 2024:43. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-367-680-0>

- VTT 2023. Lauhkonen, A & Markkanen, J. Tieliikenteen ajoneuvokanta- ja päästöennusteen päivitys 2023.
https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Tieliikenne_PaastoPaivitys_2023.pdf
- Välisalo, T. (toim.), Jouttijärvi, T., Kallio, A., Kauppi, S., Kauppila, P., Komulainen, H., Laasonen, J., Laine-Ylijoki, J., Leppänen, M., Reinikainen, J. & Wahlström, M. 2014. Kaivosten stressitestit 2013. Ympäristöministeriön raportteja 2/2014.
- Walston, L.J., Li, Y., Hartmann, H.M., Macknick, J., Hanson, A., Nootenboom, C., Lonsdorf, E. & Hellmann, J. 2021. Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States. *Ecosystem Services* 47, 101227.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101227>
- Wang Shifeng, Wang, Sicong & Liu, J. 2019. Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*. Volume 210. Pages 804-810. ISSN 0959-6526.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.031>
- Wiesen, K., Teubler, J. & Rohn, H. 2013. Resource Use of Wind Farms in the German North Sea. The Example of Alpha Ventus and Bard Offshore I. *Resources*. 2. 504–516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112087>
- Williams, J.T., Mambu Vangu, A., Balu Mabiala, H., Bambi Mangungulu, H., Tissingh, E.K. 2021. Toxicity in the supply chain: cobalt, orthopaedics, and the Democratic Republic of the Congo. *The Lancet Planetary Health*, Volume 5, Issue 6, Pages e327-e328. ISSN 2542-5196.
[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00057-7)
- Ympäristöministeriö 2013. Asetus 4/2013 asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä.
<https://finlex.fi/fi/viranomaiset/maarayskokoelmat/ymparistoministerio/2013/40799>
- Ympäristöministeriö 2017. Asetus 1010/2017 asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta
<https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2017/1010>
- Ympäristöministeriö 2020. Pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia 2020–2050. <https://ym.fi/korjausrakentamisen-strategia>
- Ympäristöministeriö 2021/17. Valtioneuvoston periaatepäätös kiertotalouden strategisesta ohjelmasta.
<https://valtioneuvosto.fi/paatokset/paatos?decisionId=0900908f8071a6e1>
- Ympäristöministeriö 2023. Asetus vapaaehtoisesta ekologisesta kompensatiosta. 933/2023. <https://www.fin-lex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230933>

- Ympäristöministeriö 2024. Ilmastovuosikertomus 2024. Ympäristöministeriön julkaisuja 2024:25. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165736/YM_2024_25.pdf
- Ympäristöministeriö 2024b. Alueidenkäytön kehityskuva: Suuntaa kestäväälle alue- ja yhdyskuntarakenteelle. Alue- ja yhdyskuntarakenteen tilanne- ja tulevaisuuskuva. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-055-2>
- Ympäristöministeriö 2025a. Kiertotalouden green deal. <https://ym.fi/kiertotalouden-green-deal>
- Ympäristöministeriö 2025b. Kiertotalouden strateginen ohjelma. <https://ym.fi/kiertotalousohjelma>
- Ympäristöministeriö 2025c. Ennallistamissuunnitelmassa huomioidaan laajasti yhteiskunnalliset tavoitteet – toimia valmistellaan kansalaisia ja sidosryhmiä kuullen. Tiedote 3.4.2025. <https://ym.fi/-/ennallistamissuunnitelmassa-huomioidaan-laajasti-yhteiskunnalliset-tavoitteet-toimia-valmistellaan-kansalaisia-ja-sidosryhmiä-kuullen>
- Ympäristöministeriö 2025d. Euroopan unionissa alustava sopu maaperän seurantaa ja terveyttä koskevasta direktiivistä. <https://ym.fi/-/euroopan-unionissa-alustava-sopu-maaperan-seurantaa-ja-terveytta-koskevasta-direktiivistä>
- Ympäristöministeriö 2025e. Ilmastovuosikertomus. Ympäristöministeriön julkaisuja 2025:20, K16/2025 vp. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/166392/YM_2025_20.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zevenhoven, R., Kinnunen, P., Levänen, J., Pirinen, H. ja Levänen, E. 2023. MAGNEX and PILCCU in Finland: deployment of CO2 mineralisation in circular economies. Baltic Carbon Forum abstrakti. <https://doi.org/10.21595/bcf.2023.23569>
- Zhou, W., Leung, L. R. & Lu, J. 2024. Steady threefold Arctic amplification of externally forced warming masked by natural variability. Nat. Geosci. <https://www.nature.com/articles/s41561-024-01441-1>

Liite A. KEITO-tutkimuksessa käytetyt sektori-, energiajärjestelmä- ja talousmallit

Rakennuskannan ja rakentamisen mallinnus

Vuoteen 2020 mennessä valmistuneen rakennuskannan energialaskenta on tehty Korjausrakentamisen pitkän aikavälin strategian 2020–2050 valmistelun yhteydessä kehitetyllä FineBuild -mallilla (Ympäristöministeriö, 2020). Siinä lähtökohtana on ollut virallisten tilastojen osoittama talotyyppikohtainen energian kulutus energialähteittäin 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 ja jäähdytystarpeen kasvu.

Vuosien 2020–2055 uudisrakentamisen määrä on laskettu VTT Build -mallilla (Vainio, 2025), jossa alueellisista väestöennusteista on johdettu tuleva asutuskysynnän määrä ja rakenne. Asuntotuotannon määrä on asutuskysynnän ja asuntotarjonnan välinen erotus. Palvelurakentaminen on sidottu alueelliseen asuntotuotantoon. Vuonna 2020 laaditut ennusteet on tarkistettu ja havaittu, etteivät viime vuosien voimakkaat suhdannevaihtelut vaikuta pitkän aikavälin ennusteeseen. 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 lämmitys- ja jäähdytystavat optimoi TIMES-VTT -malli.

Maatalouden tasapainomalli

Suomen maataloutta kuvaavaa alueellinen sektorimalli (DREMFI) on Suomen maatalouden päätuotantosunnat ja niiden kotimaisen kysynnän ja ulkomaankaupan kattava taloudellinen osittaistasapainomalli, jossa on neljä suuraluetta: Etelä-Suomi, Sisä-Suomi, Pohjanmaa ja Pohjois-Suomi. Malli simuloi kilpailullisia markkinoita vuosittain 1995–2055. Suomen maatalous kilpailee EU:n sisämarkkinoilla, ja kotimaiset ja tuontituotteet ovat epätäydellisiä substituuotteja (Armington-oletus), mutta voivat hyvin korvata toisiaan, kuitenkin niin, että niiden hinnat voivat vähän tai jossain määrin poiketa toisistaan. Elintarvikkeiden kysyntä määräytyy annetun väkiluvun kehityksen ja keskimääräisen ruokavaliolle annetun muutostrendin mukaisesti. Suuralueet jakautuvat pienempiin tuotannollisiin alueisiin tukiväyhykejaon mukaisesti. Näin saavutetaan varsin tarkka tukipolitiikan kuvaus, eikä alueellisia keskiarvoja maataloustuista tarvitse laskea. Kaikkiaan DREMFIAssa on 18 eri tuotannollista aluetta (Lehtonen 2001, Lehtonen 2015).

DREMFA-malli on alun perin suunniteltu ja toteutettu siten, että sen avulla voidaan arvioida erityisesti CAP:in vaikutusta maataloustuotannon määrään, sijoittumiseen ja maataloustuloon Suomessa (Lehtonen & Niemi 2018). Mallissa huomioidaan tarkoin erityisesti CAP pilarien 1 ja 2 mukaiset tuet tukiehtoineen, kuten pilarin 1 tuotantosidonnaiset eläinkohtaiset tuet, eräille kasveille (kuten valkuaiskasvit) hehtaariperusteisesti maksettavat tuet, ja tuotannosta riippumattomat peltoalalle maksettavat tuet. Samoin huomioidaan EU-rahoitteinen ja kansallisesti rahoitettavat osat luonnonhaittakorvauksesta (LHK) ja pääosa ympäristökorvauksen toimenpiteistä ja maksuista. Lisäksi huomioidaan Suomen kansallisten maatalouspoliittisten toimenpiteiden, kuten maitolitran ja eläintä kohden maksettavat tuet C-tukialueilla. Malli ei sisällä lainkaan puutarhataloutta, eikä poro-, lammas-, hevos- ja turkistaloutta. Näiden tuotantosuuntien osalta tyydytään asiantuntija-arvioihin tai pidetään tuotannon ja eläinten taso lähellä viimeksi havaittuja tilastoarvoja tai muutaman viime vuoden keskiarvoja. Näiden merkitys pellonkäytölle ja kasvihuonekaasupäästöjen kehitykselle on kuitenkin vähäinen, ja mallissa mukana oleva ns. perusmaatalous kattaa yli 95 % maatalouden pellonkäytöstä. Pellonkäyttö samoin kuin maidon, naudanlihan, sianlihan ja siipikarjanlihantuotannot määräytyvät taloudellisen tasapainoanalyysille tyypillisellä suhteellisen edun periaatteella, kun kotimainen tuotanto eri alueilla kilpailee tuonnin kanssa. Malli huomioi OECD-FAO 2023 (www.agri-outlook.org) maataloustuotteiden hintaennusteet vuoteen 2032 (oletuksena vakioituneet reaali hinnat tämän jälkeen) ja tutkimuskonsortiolle annetut energian hintaennusteet.

Suomen maatalouden rakennekehitys on mallinnettu endogeenisesti niin, että lypsylehmien lukumäärän havaittu kasvu suurimmissa tilakokoluokissa ja tärkeimmillä tuotantoalueilla Suomessa toteutuu ja otetaan pellonkäytössä huomioon. Malli on validoitu siten, että vuosien 1995–2022 toteutunut kehitys kotieläintuotannon kokonaismäärissä ja pellonkäytössä likimain toteutuu. Samalla huomioidaan Suomessa tuotettujen maataloustuotteiden kulutus kotimaassa yhtä aikaa tuonnin ja viennin muutosten kanssa. Kotimainen kulutus voidaan tyydyttää kotimaisella tuotannolla tai kilpailevilla tuontituotteilla. Kulutus noudattaa vuosina 1995–2022 toteutunutta kehitystä ja vuoden 2022 kulutusta vuosina 2023–2050.

Maatalouden tuote- ja panoshinnat määräytyvät pääosin EU- ja globaalilla tasolla, ja siten ulkoiset panos- ja tuotehinnat pätevät ulkomaankaupassa eli viennissä ja tuonnissa. Kotimaan markkinoilla maataloustuotteiden hintataso voi kuitenkin vähäisessä määrin poiketa EU:n keskihinnasta. Tuotekohtaiset hintapoikkeamat vastaavat viimeisen 20 vuoden aikana toteutuneita poikkeamia ja ne toteutuvat mallin maidon ja lihan tuottajahinnoissa siten, että kotimaiset ja ulkomaiset tuotteet ovat epätäydellisiä substituutteja keskenään. Ne voivat siten korvata toisiaan varsin pitkälle, mutta kuitenkin rajallisesti ollen laadullisesti erilaisia. Esimerkiksi Suomeen tuodaan ja Suomesta viedään osin erilaista lihaa (eri ruhonosia) ja eri maitotuotteita (joita mallissa mukana yhteensä 18 erilaista).

Eläinten rehunkulutus muuttuu hintasuhteiden ohjaamana ruokintasuositusten antamissa puitteissa eri tuotostasoille. Eläintuotanto vaikuttaa vahvasti rehun tuotantoon ja pellonkäyttöön. Eri kasvien pinta-alojen kehitykseen vaikuttavat myös lannoitteiden ja maataloustuotteiden hinnat sekä maataloustuet. Näin ollen DREMFA-malli toistaa pääpiirteissään 1995–2022 kehityksen Suomen maatalouden tuotannossa ja maankäytössä ja sisältää keskeiset tarvittavat muuttujat arvioitaessa maatalouden kehitysuria ja maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen kehitystä vuoteen 2055.

Epäorgaanisten lannoitteiden hintojen nousu, joka aiheutuu fossiilisen energian hintojen noususta, vaikuttaa mallissa suoraan kasvin lannoitusta ja satotasoa vähentävästi. Uudet ja osin muita tukia korvaavat maataloustuet matalan lannoitustason nurmille kannustavat tyypeä sitovien apilanurmiseosten käyttöön. Tämä toteutuu mallissa siten, että voimakkaaseen epäorgaaniseen typpilannoitukseen perustuvan säilörehunurmen tuotanto vähenee ja korvautuu osittain matalamman lannoituksen ja satotason nurmituotannolla. Mallia on jo pitkään käytetty mm. arvioitaessa CAP-uudistusten ja maatalouden ympäristöohjauksen vaikutuksia Suomen maatalouteen (Lehtonen & Niemi 2018, Lehtonen & Rankinen 2015, Huttunen ym. 2015) sekä aiemmissa selvityksissä liittyen ilmasto- ja energiastrategiaan (Koljonen ym. 2020). Mallin realistisuutta panoskäytössä ja satoisuudessa ovat parantaneet aiemmat tutkimukset mm. apilanurmien lisäämisen edellytyksistä ja vaikutuksista (Lehtonen & Niskanen 2016), ilmastomuutokseen sopeutumisesta ja sen hillinnästä (Lehtonen ym. 2022), tuloksina vaikutukset maatalouden tuotantoon, tuloihin ja pellonkäyttöön alueittain.

DREMFA tuottaa tässä tutkimuksessa kasvihuonekaasulaskennan lähtötiedoiksi väkilannoituksen typpimäärän, pellonkäytön ja eläinmäärät tärkeimmille eläinluokille.

Maankäytön ja maankäytön muutosten pinta-alojen määrittäminen

LULUCF-sektorin päästöt ja poistumat on laskettu kuudessa maankäyttöluokassa, jotka kattavat Suomen maa-alan ja sisävedet. Kukin maankäyttöluokka jakautuu skenaariolaskennassa kahteen osaan siten, että tietyn vuoden päästöihin/poistumiin sisältyvät: 1) kyseisenä vuonna tapahtuvista maankäytön muutoksista aiheutuvat päästöt sekä tätä vuotta edeltävien 19 vuoden muutosalueiden päästöt ja poistumat, 2) alueiden päästöt/poistumat, joilla ei ole tapahtunut maankäytön muutoksia tai muutoksesta on yli 20 vuotta (pl. turvetuotantoalueet, joilla muutos aika 5 vuotta). Päästölaskentaan tarvitaan molempien ryhmien pinta-alat jokaiselle kuudelle maankäyttöluokalle, sekä ryhmässä 1 vuotuinen maankäytönmuutosmatriisi kaikille muutoksille. Käytetty maankäyttöluokitus vastaa Suomen kasvihuonekaasuinventaarion (KHK-inventaario) luokitusta (Tilastokeskus 2025d).

Maankäytön ja maankäytön muutosten pinta-alat on tuotettu Haakanan ym. (2015) kuvaamalla menetelmällä, jossa maankäytön muutoskenaarioiden taustalla ovat vuosina 2014–2018 tapahtuneista maankäytön muutoksista lasketut trendit ja keskiarvot vuotuisista muutospinta-aloista. Pääasiallinen tietolähde maaluokkamutosten historiatietojen laskennassa on valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) maastoaineistot. Menetelmässä historiatietoihin on yhdistetty kunkin skenaarion maankäyttöä koskevat lähtöoletukset. Times-VTT-mallin energijärjestelmän kehityksestä on johdettu turpeen energiakäytön, aurinkovoiman ja tuulivoiman vaikutukset maankäyttöön pääosin kuten Maanavilja ym. 2021 raportissa. Tuulivoimaloiden määrä suhteessa tuotantoon (TWH) on päivitetty Suomen tuulivoimayhdistys ry:n tilastojen mukaiseksi (STY 2023, Koljonen ym. 2024). Aurinkovoimaloiden määrä ja maankäyttövaikutukset on arvioitu TIMES-VTT-mallin tuotantoluvuista olettamalla, että yhden TWh:n tuottamiseksi aurinkovoimalla vaaditaan noin 1 000 hehtaaria maapinta-alaa (Lehtilä 2019). WEM-skenaariossa aurinkovoimaloiden sijoittuminen eri maaluokkiin jaettiin Koljonen ym. 2024 mukaisesti 1/3 metsämaalle, 1/3 maatalousmaalle ja 1/3 rakennetulle maalle. Tämän lisäksi rakennettavan aurinkovoiman oletettiin sijoittuvan voittopuolisesti Etelä-Suomeen. Turvetuotantoalueiden jälkikäyttöluokkien pinta-alojen laskenta ja osuudet perustuvat pääosin Maanavilja ym. 2021 raporttiin. Energia-turpeen tuotannon kehitys johdettiin TIMES-VTT-mallin tuottamasta turpeen energiakäytöstä (PJ/v). Energiaturpeen tuotantoalan oletetaan vähenevän samassa suhteessa kuin turpeen energiakäytön. Muuhun kuin energiakäyttöön tarkoitetun turpeen (kasvu-, kuivike- ja ympäristöturve ym.) tuotannon oletettiin pysyvän ennallaan. Tuotannosta vapautuneiden alueiden oletetaan siirtyvän uuteen maankäyttöön viiden vuoden kuluttua tuotannon päättymisestä. Metsityksen osuudeksi oletetaan lähtökohtaisesti 70 %, maatalousmaiden 20 %, kosteikkojen noin 10 %, joista puolet altaita. Taulukko 8 mukaiset toimenpiteet muuttivat näitä osuuksia merkittävästi. Rakennuskannan kehityssennustetta ohjataan Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) rakennetun maan mallin tuloksesta lasketulla rakennetun maan suhteellisella kehityskululla vuoteen 2020 nähden. SYKEN mallinnus kattaa yhdyskuntarakentamisen, vapaa-ajan asunnot ja muun rakennetun maan (liikennealueet, maa-ainesten otto, kaatopaikat, ym.) ja huomioi poistuvan rakennuskannan ja väestöennusteen (Tiitu ym. 2015). Skenaarioissa on käytetty SYKEN vuonna 2021 päivittämää rakennetun maan kehitystä (Maanavilja ym. 2021) ja edelleen skaalattu vuoden 2021 väestöennusteella (Tilastokeskus 2021).

Kasvihuonekaasupäästöjen ja poistumien laskenta maatalous ja maankäyttösektoreilla

Skenaarioiden päästöt ja poistumat laskettiin pääosin Suomen kasvihuonekaasuinventaarion (KHK-inventaario) luokitusten ja menetelmien mukaisesti (Tilastokeskus 2025d). Laskennat noudattavat 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories -ohjeita (IPCC 2006). Eloperäisten

maiden päästöjen laskentaan käytetään myös ohjeen kosteikkoliitettä (IPCC 2014) ja huuhtouman, lannankäsittelyn sekä maatalousmaiden päästöjen laskentaan myös 2019 täsmennystä (IPCC 2019). Aineen, kuten biomassan, hiilisisältönä on joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta käytetty 50 prosenttia. Hiili on muunnettu hiilidioksidiksi (CO₂) kertoimella (–44/12). Kasvihuonekaasut on yhteismitallistettu hiilidioksidiekvivalenteiksi IPCC:n viidennen arviointiraportin (IPCC AR5 WG1 Ch8 2013) GWP (Global Warming Potential) -kertoimilla, jotka ovat hiilidioksidille (CO₂) 1, metaanille (CH₄) 28 ja dityppioksidille (N₂O) 265. Skenaarioissa käytetty säädata (esim. Yasso-mallinnuksessa) on vuosien 2014–2022 keskiarvo (kts. LIITE C).

Maataloussektorilla päästöjä lasketaan viidestä pääluokasta: tuotantoeläinten ruoansulatus (CH₄), lannankäsittely (CH₄, N₂O), maatalousmaat (N₂O), kalkitus ja urean käyttö (CO₂). Maatalousmaiden päästölaskenta kattaa N₂O päästöt, jotka liittyvät lannan levitykseen, väki- ja orgaanisten lannoitteiden käyttöön sekä laiduntavien eläinten aikaansaamaan lannoitukseen. Lisäksi laskenta kattaa peltoon jätettävien kasvintähteiden, orgaanisten viljelysmaiden ja ruohikkoalueiden päästöt sekä orgaanisen aineksen hajoamisesta syntyvät päästöt kivennäismailla. Maatalouden päästölaskennassa käytetään DREMFI-mallin tarjoamia tietoja maataloustuotannon kehityksestä, kuten keinolannoituksen typpimäärää, pellonkäyttöä sekä keskeisten tuotantoeläinten (naudat, siat, siipikarja) määriä. Lisäksi huomioidaan porojen, lampaiden, vuohien, hevosten ja turkiseläinten määrät, jotka pysyvät vuosien 2021–2023 keskimääräisellä tasolla. Kalkituksen ja urean käyttö on vakioitu viimeisen viiden vuoden keskimääräiselle tasolle vuoteen 2055 asti. DREMFI-mallista saadut pellonkäyttötiedot sovitetaan yhteen muun maankäytön kanssa (kts. maankäytön ja sen muutosten mallintaminen), ja päästöt lasketaan näillä muokatuilla pinta-aloilla, jotka vastaavat LULUCF -sektorin laskentaa.

Lypsylehmien maidontuotto ja nautakarjan bruttoenergiansaanti kasvaa KHK-inventaariossa raportoidun kehityksen mukaisesti myös tulevaisuudessa. Eläinten ruoansulatuksen metaanipäästöihin vaikuttavan 3NOP-rehulisäaineen päästövähennysvaikutuksen laskenta perustuu IRMA-hankkeen alustaviin tuloksiin. Niiden mukaan päästövähennys on noin –10 % erillisruokintaisilla ja –25 % seosruokintaisilla nautoilla. Seosruokintaisia nautoja on nykyisin noin puolet nautakarjasta ja tämän osuuden oletettiin pysyvän vakiona vuoteen 2055 saakka. Eläinten typeneritykset säilyvät skenaariossa pääosin vuosien 2021–2023 keskiarvon tasolla. Nautojen kohdalla eläinten koon ja siitä seuraavan typenerityksen kasvu jatkuu inventaarion mukaisessa trendissä vuoteen 2040 asti, minkä jälkeen typeneritys vakiintuu.

Lannankäsittelyssä erilaisten lantajärjestelmien (lietelanta, kuivikelanta, kuivikepohjalanta sekä kuivalanta ja virtsa) suhteellisiin osuuksiin arvioitiin tulevaisuudessa tapahtuvan vain vähäisiä muutoksia lukuun ottamatta lantabiokaasutusta, jonka osuus kasvaa nykyiseltä parin prosentin tasolta aina 38

%:iin vuoteen 2055 mennessä. Maatilojen lannankäsittelyn päästöt voivat vähentyä biokaasutuotannon myötä, mikäli laitosten rakentamisessa ja operoinnissa noudatetaan kestäviä käytäntöjä (Luostarinen ym. 2023). Lannan biokaasutusta ei vielä toistaiseksi ole sisällytetty KHK-inventaarioon.

Skenaariolaskelmissa lannan biokaasutusta käsiteltiin yhtenä lannankäsittelymuotona, jonka päästökertoimet otettiin IPCC 2019 –ohjeistuksesta (metaanille high quality digester, open storage -kerroin 3,55 %, dityppioksidille vakiokerroin 0,06 %, jotka kuvastavat mädätteen varastoinnin aikana syntyviä päästöjä). Lantojen osuudet biokaasutuotantoon eri eläinryhmissä ovat aiemmin tehtyjä asiantuntija-arvioita (Miettinen ym. 2022, taulukko 5) ja biokaasutuksen oletetaan korvaavan muita lantajärjestelmiä tasaisesti samassa suhteessa.

Skenaarioihin sisältyvien turvepeltotoimien kasvihuonekaasuvaikutukset kohdistuvat sekä maatalous- että LULUCF-sektorille. Vaikutusten suuruus riippuu toteutuspinta-alojen (Taulukko 8) ja käytettyjen päästökertoimien (LIITE A taulukko 1) lisäksi oletuksista pellon aiemmasta käytöstä. Ilmastokosteikkojen, vetettyjen peltujen ja nurmen kosteikkoviljelyn oletettiin aiemmin olleen nurmiviljelyssä. Ruokohelven ja järviruo'on kosteikkoviljelyaloilla lähtötilanteena pidettiin viljelyä, josta kolmasosa oli yksivuotisten kasvien ja kaksi kolmasosaa monivuotisten nurmien viljelyä. Vedenpinnan tasolla -5 – -10 cm viljeltyjen kasvien (osmankäämi, kihokki tms.) oletettiin aiemmin olleen valtaosin nurmiviljelyä ja vain 10 % alueista oletettiin olleen yksivuotisten kasvien viljelyä.

LIITE A Taulukko 1. Päästökertoimet turvemaiden eri pellonkäyttömuodoissa ja erilaisilla vedenpinnan tasoilla. (Lähteet: IPCC 2014, Bianchi ym. 2021).

Pellonkäyttömuoto	CO ₂ , t/ha LULUCF	CH ₄ , t CO ₂ -ekv./ha LULUCF	N ₂ O, t CO ₂ -ekv./ha LULUCF	N ₂ O, t CO ₂ -ekv./ha Maatalous
Yksivuotinen kasvi (vilja) ¹	29	-	-	5
Monivuotinen (nurmi) ²	21	-	-	4
Kosteikkoviljely, pohjaveden pinta -30 cm ³	13	1	-	1
Kosteikkoviljely, pohjaveden pinta -5--10 cm ⁴	-4	4	-	0.5
Ilmastokosteikko, vettäminen pois viljelykäytöstä ⁴	-4	4	0.5	-

1) IPCC 2014, taulukko 2.1 Cropland drained

2) IPCC 2014, taulukko 2.1 Grassland drained

3) IPCC 2014, taulukko 2.1 Grassland shallow drained, nutrient rich

4) Bianchi ym. 2021, restoration

LULUCF-sektorin päästöt ja poistumat koostuvat hiilivarastojen (elävä biomassa, kuollut puuaines, karike ja maaperä) muutoksista (CO₂) sekä metaani- (CH₄) ja dityppioksidipäästöistä (N₂O).

Yli 20 vuotta metsämaana olleen alueen puuston hiilinieluarvio laskettiin MELA-mallinnuksen tuottaman runkotilavuuden kasvun ja poistuman perusteella. Nämä muunnettiin ensin biomassakasvuksi ja -poistumaksi KHK-inventaarion käyttämien biomassan muuntokertoimien avulla, minkä jälkeen laskettiin biomassakasvun ja -poistuman erotus (ks. LIITE C). Näin lasketut puuston biomassan kasvun ja poistuman hehtaarikohtaiset erotukset kohdennettiin mallinnuksessa käytettyjen kymmenvuotisjaksojen keskivuodelle. Esimerkiksi kauden 2029–2038 hakkuukertymän ja metsänhoidon mukainen kasvu ja poistuma kohdennetaan metsämaaluokassa vuodelle 2034. Väli vuosien arvot interpoloitiin ja tulokset skaalattiin vastaamaan KHK-inventaarion metsämaan pinta-alaa kertomalla hehtaarikohtaiset erotukset skenaarioiden mukaisella metsämaan pinta-alalla. Maaperän karikesyötteiden laskennassa tarvittavat puustotiedot perustuvat niin ikään MELA-mallinnukseen. Muuten skenaarioiden maaperän hiilitaseet laskettiin kasvihuonekaasuinventaarion menetelmillä (Tilastokeskus 2025d). Inventaariossa kivennäismaiden maaperän hiilivaraston muutokset estimoidaan Yasso07-maamallilla, ja ojitettujen turvemaiden hiilidioksidipäästöt Alm ym. 2023 julkaisun menetelmällä.

Metsitetyille alueille (ollut metsämaata korkeintaan 20 vuotta) puuston hiilivaraston muutos laskettiin metsitysalueiden keskimääräisillä puuston kasvu- ja poistuma-arvioilla kuten KHK-inventaariossa (Tilastokeskus 2025d). Alle 20 vuotta sitten metsämaaksi muutettujen turvemaiden maaperäpäästöt laskettiin vertaamalla aikaisemman maankäytön päästöjä ja elävien puiden sekä maaperän kasvillisuuden kautta maaperään tulevan hiilen erotusta. CH₄- ja N₂O-päästöt laskettiin KHK-inventaarion kasvupaikkatyyppittäisillä päästökertoimilla (Tilastokeskus 2025d). Kivennäismaiden maaperän hiilivaraston muutokset estimoitiin Yasso07-maamallilla kuten KHK-inventaariossa (Tilastokeskus 2025d). Metsitysalueille laskettiin myös maankäytön muutoksesta aiheutuva typen mineralisaation N₂O-päästö (Tilastokeskus 2025d). Maastopalojen, ennallistamispolttujen ja kulituksen CH₄- ja N₂O-päästöt oletettiin olevan vuosien 2019–2023 raportoitujen päästöjen keskiarvo. Typpilannoituksen N₂O-päästöt saatiin kertomalla MELA-mallinnuksen mukainen lannoitettu pinta-ala vuosien 2019–2023 keskimääräisellä lannoituksen hehtaarikohtaisella päästöllä (Luke 2024a, Tilastokeskus 2025d).

Viljelysmaan kivennäismaiden hiilivaraston muutos estimoitiin Yasso07-maamallilla kuten KHK-inventaariossa (Tilastokeskus 2025d), mutta skenaarioissa tilastotietojen sijaan käytettiin DREMFI-mallin tuottamia satotasoja ja eläinmääriä. Ruohikkoalueiden kivennäismaan hiilivarastossa ei oleteta tapahtuvan muutosta. Viljelysmaan ja ruohikkoalueiden turvemaiden hiilidioksidipäästöt laskettiin KHK-inventaarion päästökertoimilla korotetun vedenpinnan kosteikkoviljelyä ja ilmastokosteikkoja lukuun ottamatta (Liite A taulukko 1). Muiden suonpohjien vettämisten oletettiin olevan turvetuotantoalueiden ennallistamista, jonka päästöt laskettiin kotimaisista tutkimuksista saaduilla kertoimilla (Lehtonen ym. 2021, taulukko 27). Kasvien

biomassat ja kasvilajikohtainen karikesyöte laskettiin KHK-inventaarion mukaisesti kuten myös biomassan ja kuolleen puuaineksen hiilivarastojen muutokset sekä typen mineralisaatiosta ja typen huuhtoumasta aiheutuvat dityppioksidipäästöt (Tilastokeskus 2025d). Kosteikot jakautuvat toisistaan poikkeaviin alaluokkiin: turvetuotantoalueet, vähäpuustoiset metsämaasta taantuneet suot ja rakennetut sisävedet, joiden päästöt laskettiin inventaarion menetelmillä ja kertoimilla (Tilastokeskus 2025d). Rakennettujen alueiden tulokset sisältävät ainoastaan maankäytön muutosalueilta aiheutuvat päästöt ja poistumat. Kun muutoksesta on kulunut 20 vuotta, alue siirtyy rakennettuna maana vähintään 20 vuotta pysyneiden alueiden luokkaan, joilla KHK-inventaarion mukaisesti ei oletettu tapahtuvan hiilivarastojen muutoksia (Tilastokeskus 2025d).

Puutuotteiden hiilivaraston muutos laskettiin kotimaassa tuotetuille ja kulutetuille sekä kotimaassa tuotetuille ja vientiin menneille puutuotteille pääryhmille sahatavara, puulevyt sekä paperi ja kartonki. Metsäteollisuuden tuotannon kehitys on kuvattu luvussa 2.5.2. Laskennassa käytetään ensimmäisen asteen hajoamisfunktioita, jossa hyödynnetään tuotteiden puoliintumisaikoja ja tuoteryhmäkohtaisia muutokertoimia (Tilastokeskus 2025d). Sahatavaran puoliintumisaika on 35 vuotta, puulevyjen 25 vuotta ja paperin ja kartongin 2 vuotta. Käytetty menetelmä perustuu IPCC 2006-ohjeeseen ja on kuvattu tarkemmin Suomen inventaarioraportissa (IPCC 2006, Tilastokeskus 2025d, Hamberg ym. 2016).

Jätesektorin laskentamalli

Jätesektorin vuosittaiset päästöt on laskettu kullekin osa-alueelle samoilla menetelmillä kuin Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa. Yksityiskohtainen kuvaus laskentamenetelmistä on esitetty kasvihuonekaasuinventaarion kansallisessa inventaarioraportissa (Tilastokeskus 2025d). Menetelmät noudattavat IPCC:n menetelmäohjeita (IPCC, 2006). Merkittävimmän osa-alueen, kaatopaikkojen, laskentamenetelmänä on First Order Decay –malli, joka huomioi kullekin laskentavuodelle rekursiivisesti aiempien vuosien jätesijoitusten aiheuttamat metaanipäästöt.

Päästöskenaariossa osa-alueiden vuosittaisten jätemäärien skaalaukset perustuvat Tilastokeskuksen väestöennusteeseen, aiempien vuosien trendeihin ja asiantuntija-arvioihin. Lähtötietoina on käytetty kasvihuonekaasuinventaarion maaliskuun 2024 lähetyksen lukemia. Väestöennusteen osalta käytettiin samaa väestöennustetta, kuin mitä PEIKKO-hankkeen WEM-P-skenaariossa. Skenaariomallin laskenta ulottuu vuoteen 2055 asti.

F-kaasupäästöjen mallinnus

F-kaasujen suurimman päästölähteen, **kylmä- ja ilmastointilaitteiden**, WEM- ja WAM-skenaariot on laskettu Syke:n laskentamallilla, jota käytetään kylmä- ja

ilmastointilaitteiden F-kaasupäästöjen laskentaan kasvihuonekaasuinventaariossa. Yksityiskohtainen kuvaus laskennasta on esitetty kasvihuonekaasuinventaarion kansallisessa inventaarioraportissa (Tilastokeskus 2025d). Päästöjen laskenta tehdään 15 alasektorin (laitetyypin) tasolla. Laskentamalli kattaa vuodet 1990–2055. Päästöjen arviointiin käytetään IPCC:n menetelmäohjeiden (IPCC, 2006) mukaista menetelmää, joka perustuu laitteiden vuosittaisen F-kaasupankin arviointiin. Päästöt lasketaan laitteiden eri elinkaaren vaiheille (laitteiden valmistus/uusasennus, vuodot käytössä olevien laitteiden kaasupankista ja laitteiden käytöstä poisto). Eri alasektoreiden laskennan lähtötiedot kerätään Syke:n vuosittaisilla kyselyillä sekä erilaisista tilastoista. Lisäksi käytössä on erilaisia asiantuntija-arvioita. Tiedot eri sektoreilla käytössä olevista kylmäaineista perustuvat Syke:n kyselyihin, erilaisiin tutkimuksiin ja asiantuntija-arvioihin. Ennustekehityksessä oleellisin tekijä on F-kaasuja sisältävien kylmäaineiden korvautuminen vaihtoehtoisilla kylmäaineilla. Tähän vaikuttaa EU-lainsäädännöstä tuleva sääntely, jonka avulla F-kaasujen käyttöä rajoitetaan ja siitä pyritään pääsemään eroon.

Muiden kuin kylmä- ja ilmastointilaitteiden F-kaasupäästöjen WEM- ja WAM-skenaariolaskenta perustuu myös kasvihuonekaasuinventaariossa käytössä oleviin Syke:n sektorikohtaisiin laskentamalleihin. Muita F-kaasujen päästölähteitä ovat solumuovien paisutusaineet, aerosolien ponneaineet, sähkönjakelulaitteet, puolijohteiden valmistus, kaasusammutuslaitteistot sekä joukko muita pieniä päästölähteitä. Eri sektoreiden laskentojen yksityiskohtaiset kuvaukset on esitetty kasvihuonekaasuinventaarion kansallisessa inventaarioraportissa (Tilastokeskus 2025d). Käytössä olevat laskentamenetelmät ovat IPCC:n menetelmäohjeiden (IPCC, 2006) mukaisia. Vuosittaiset laskentojen lähtötiedot kerätään Syke:n sektorikohtaisilla kyselyillä. Kuten kylmä- ja ilmastointilaitteiden kohdalla, myös muun F-kaasujen käytön kohdalla oleellisin ennustekehityksen tekijä on F-kaasuja korvautuminen vaihtoehtoisilla aineilla EU-sääntelyn vaikutuksesta.

Vesiliikenteen laskentamalli

Vesiliikenteen skenaariot on laskettu VTT:n MEERI-mallilla. MEERI on Suomen vesiliikenteen suorien pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentamalli, jota hyödynnetään Suomen liikenteen päästöinventarioiden laskennassa. Mallikokonaisuuteen sisältyy kaksi erillistä mallia: laivaliikennemalli ja venemalli. Venemallilla lasketaan huviveneiden, risteilyalusten, kalastusalusten, työveneiden ja -alusten, lauttojen ja lossien päästöt. Laivaliikennemalliin kuuluvat yli 300 bruttotonnin vetoisuuden alukset, mukaan lukien jäänmurtajat. Kotimaan vesiliikenteeksi määritellään matkat Suomen satamien välillä, vaikka MEERI-mallilla voidaan laskea myös koko Suomen talousvyöhykkeellä tapahtuva, Suomen satamiin ja satamista pois suuntautuva ulkomaan meriliikenne.

Meriliikenteen aktiviteetin laskenta perustuu Liikenne- ja viestintäviraston (Traficom) sekä Tullin ylläpitämään Portnetin satamassakäyntidataan. Laivojen suoritteita ovat satamien välillä ajatut laivakilometrit. Dataan sisältyvät myös

satamassa-ajajat ja laiturissaoloajat. Päästöt lasketaan laivakilometrien, satamassa-ajajien sekä laiturissaoloajien perusteella. Meriliikenteen ennusteajajien päästökertoimien kehitystä kuvaa keskimääräinen päästökertoimen muodossa g/kWh, mikä sisältää väyläajon lisäksi laivojen liikkeet satamissa ja laiturissa olon, ja on yhdistelmä sekä pääkoneista että apukoneista.

Sisävesiliikenteen ja muiden vesikulkuneuvojen energiankulutuksen ja päästöjen laskenta perustuu Traficomien venerekisterin tietoihin sekä kyselytutkimuksiin perustuviin arvioihin rekisteröimättömien veneiden määrästä. Lauttojen ja lossien kulutustiedot ovat Suomen Lauttaliikenne Oy:ltä. Venemallissa lasketaan arvioitu polttoaineen- ja energiankulutus veneiden käyttöä koskevien kyselytutkimusten vastausten perusteella (kWh/vuosi). Päästöt lasketaan arvioidun kulutuksen perusteella. Huviveneet käyttävät tieliikenteessä saatavia bensiini- ja dieselpolttoaineita, jolloin niiden kulutukseen kohdentuu myös biopolttoaineiden jakeluvelvoite (446/2007). Sisävesiliikenteen polttoöljyn kulutukseen sovelletaan biopolttoöljyn jakeluvelvoitetta (418/2019).

Rautatieliikenteen laskentamalli

Raideliikenteen skenaariot on laskettu VTT:n RAILI-mallilla, joka on Suomen rautatieliikenteen käytönaikaisten päästöjen laskentamalli. Energian- ja polttoaineenkulutuksen laskenta perustuu junatyypikohtaisiin ja rataosuuskohtaisiin vuosisuoritteisiin, joita ovat vedetyt bruttotonnikilometrit, veturina-ajokilometrit, vaihtotyötunnit ja lähijunaliikenteen junayksikkökilometrit, sekä suoritekohtaisiin kulutuskertoimiin. Tulokset kalibroidaan vastaamaan operaattoreiden raportointia kokonaiskulutusta. Polttoaineen kulutus lasketaan erikseen matkustajaliikenteelle, tavaraliikenteelle ja ilman vaunuja liikkuville vetureille sekä ratapihatoiminnalle. Sähkökäyttöisille junille ei lasketa päästöjä, vain suora sähköenergian kulutus. Junien polttoöljyn käyttöön kohdistuu biopolttoöljyn jakeluvelvoite.

RAILI:n ennusteissa kokonaissuoritteiden kehitys perustuu Traficomien suorite-ennusteeseen (2022). Kehitys pohjautuu oletukseen, että suorite-ennusteen tavarajunaliikenteen kuljetettujen tonnimäärien kehitys ja matkustajajunaliikenteen henkilökilometrien kehitys vaikuttaa suoraan verrannollisesti bruttotonnikilometrien kehitykseen.

Työkoneiden laskentamalli

Työkoneiden sektorikohtainen mallinnus on toteutettu VTT:n TYKO -mallilla. TYKO on työkoneiden kanta- ja päästölaskentamalli, jota hyödynnetään Suomen päästöinventaaroiden laskennassa. Mallikokonaisuus koostuu kolmesta osamallista: TYKObensa, TYKODiesel ja TYKOtraktorit. Malli arvioi Suomen työkonekannan työkonetyppeittäin, huomioiden moottorit, nimellistehot, vuosimallit, käyttötavan (ammattikäyttö/yksityinen) sekä käyttöiän. Käyttövoimista

mukana ovat bensiini, diesel ja kaasu. Sähkökäyttöisiä työkoneita ei sisällytetä malliin sen vanhentuneen rakenteen vuoksi, minkä seurauksena niiden lukumäärää tai energiankulutusta ei voida arvioida. Sähkökäyttöisten koneiden yleistyminen näkyy kuitenkin polttomoottorikäyttöisten koneiden määrän vähenemisenä sekä kulutuksen ja päästöjen laskuna.

Työkonekannan lähtötietoina käytetään rekisterissä olevien työkoneiden tilastoja, työkonemyyjiltä saatuja myyntitilastoja, aiempien vuosien selvityksiä työkoneiden lukumääristä sekä asiantuntija-arvioita. Kantaennuste perustuu asiantuntija-arvioihin tulevien vuosien myyntikehityksestä.

Mallissa työkoneiden suoritteena käytetään kunkin työkonetyypin vuotuista työn määrää (kWh/vuosi), joka lasketaan moottorin nimellistehon, kuormitusasteen ja vuotuisen käyttöajan perusteella. Käyttöajat on eriytetty uudemmille ja vanhemmille koneille, ja ne perustuvat asiantuntija-arvioihin.

Laskennallisen polttoaineenkulutuksen perusteella arvioidaan työkoneiden päästöt. Bensiinikäyttöisten koneiden oletetaan käyttävän pääosin tieliikenteen bensiiniä, jolloin niihin kohdistuu biopolttoaineiden jakeluvelvoite (446/2007). Dieselkäyttöisten koneiden oletetaan kuluttavan moottoripolttoöljyä, johon sovelletaan biopolttoöljyn jakeluvelvoitetta (418/2019). SCR-tekniikalla varustetut dieselmoottorit käyttävät myös ureaa, josta syntyy CO₂-päästöjä. Kaasukäyttöisten koneiden oletetaan käyttävän nesteytettyä maakaasua ilman biokomponenttia

Energiajärjestelmän laskentamalli

Energiajärjestelmän integroidussa mallinnuksessa ja analysoinnissa käytetty 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 puolestaan pohjautuu IEA ETSAP TIMES-mallinnusjärjestelmään (Loulou ym. 2016). Mallissa on kuvattu Suomen, Pohjoismaiden ja muun Euroopan energiajärjestelmät. Menetelmällisesti malli on niin sanottu osittais-tasapainomalli, joka maksimoi kuluttajien ja tuottajien yhteenlaskettua taloudellista ylijäämää. Malli sisältää varsin yksityiskohtaisen kuvauksen sekä energian tuotannon ja käytön nykyjärjestelmästä että tulevaisuuden teknologia-vaihtoehtoista, ja se kattaa kaikki Kioton pöytäkirjan kasvihuonekaasupäästöt. Yksinkertaistettu rakennekaavio on esitetty alla olevassa kuvassa.

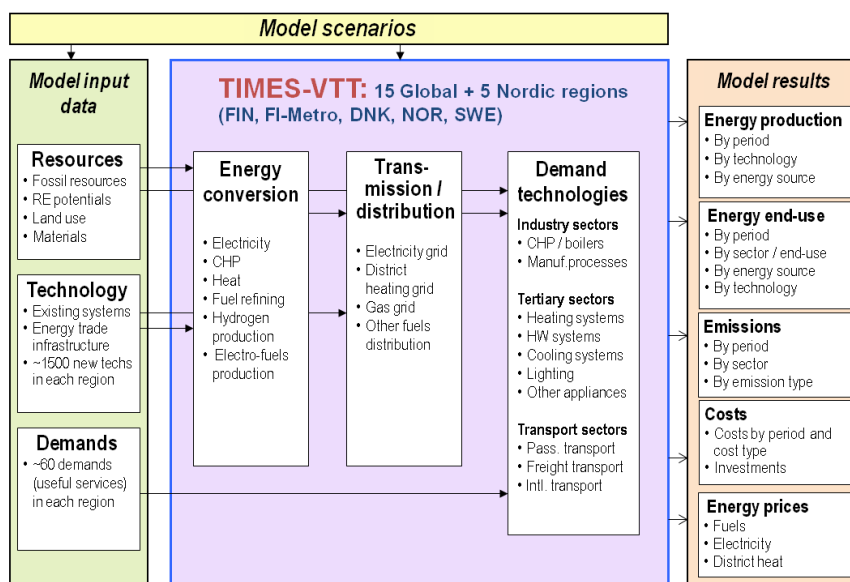
Mallin tietokannan energiajärjestelmäkuvauksessa ovat mukana energian-tuotanto ja -siirtojärjestelmä, rakennuskanta, asumisen ja palvelujen energian käyttökohteet, autokanta ja muu liikennevälinekanta, energiantensiivisten teollisuustuotteiden tuotantoprosessit ja -laitokset, muun teollisuuden energian loppukäyttökohteet sekä maa- ja metsätalouden energiakäyttö. Lisäksi mallissa on kuvattu muut kuin energiajärjestelmään suoraan liittyvät päästölähteet, kuten

maanviljely ja karjatalous, jätehuolto, F-kaasupäästöjen lähteet ja teollisuusprosessien päästöt. 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 energialähteiden tekniset potentiaalit, polttoaineiden globaali kauppa, päästökauppa (ml. CO₂:n kuljetus- ja varastointipalvelujen kauppa). Malli on kaikkien kalibroitu IEA:n tilastojen mukaisesti kansallisiin energiataseisiin. TIMES-VTT-mallia ja sen tietokantoja on kuvattu useissa tieteellisissä artikkeleissa (esim. Koljonen & Lehtilä 2015, Lehtilä & Koljonen 2018).

TIMES-VTT-mallissa on käytetty laajasti myös sektorimallien tuottamia tuloksia ml. liikenne, rakennukset, jätesektori sekä F-kaasut ja maataloustuotanto ja siihen liittyvät KHK-päästöt. Keskeisiä TIMES-VTT-mallin käyttämiä lähtötietoja ovat:

- talouden eri sektoreiden kehitys eli teollisuussektoreiden, kotitalouksien, palvelujen, maa- ja metsätalouden ja kaivannaisteollisuuden kehitykset;
- energiantensiivisen teollisuuden toimialojen eri tuotteiden tuotannon ja energian ominaiskulutusten kehitykset;
- liikennevälinekanta sekä liikkumis- ja kuljetustarpeiden kehitys liikennemuodoittain;
- nykyinen rakennuskanta ja sen poistumat sekä kannan tuleva kehitys rakennustyyteittäin;
- työkoneiden käyttö sektoreittain sekä niiden kehitysarviot TYKO-mallin arvioiden pohjalta
- nykyiset ja päätetyt energia- ja ilmastopoliittiset ohjauskeinot ml. energia- ja päästöverot, tuet sekä energiatehokkuutta koskevat säädökset jne.;
- energiajärjestelmän nykyisen laitos- ja laitekannan laskennallinen poistuma ja uusiin investointeihin käytettävissä olevien teknologiavaihtoehtojen oletettu teknis-taloudellinen kehitys kaikilla sektoreilla;
- päätetyt investoinnit energiajärjestelmän kannalta keskeisiin uusiin energiantuotantolaitoksiin ja teollisuusprosesseihin.

Energiajärjestelmämalli tuottaa tuloksenaan sellaisen energian hankinta- ja loppukäyttöjärjestelmän kehityksen, jolla hyötyenergian kysyntä voidaan kussakin skenaariossa tyydyttää mahdollisimman kustannustehokkaasti, ottaen huomioon muun muassa talouden eri sektoreiden toimijoille kohdistuvat verot, tuet ja investointien tuottovaatimukset. Kasvihuonekaasupäästöjen määrät saadaan tuloksista eriteltyä sektoreittain ja päästölajeittain tarvittaessa prosesseittain. Tulokset sisältävät myös muun muassa kaikkien mallissa kuvattujen tuotantolaitosten ja -teknikoiden kapasiteetit, investointikustannukset ja käyttökustannukset. Malli tuottaa tuloksenaan myös energiahyödykkeiden hinnat, jotka edustavat pitkän aikavälin tasapainohintoja.



Kuva A-51. TIMES-mallin komponentit ja yksinkertaistettu yhden alueen rakennekaavio. Alueiden välillä on tärkeimpien energiahyödykkeiden kauppa.

Liite B. WEM- ja WAM-skenaarioiden määrittelyt

WEM-skenaarion laskentaan liitetty EU:n määrittelyt (hallintomalliasetus) ja EU:n asettamat tavoitteet Suomelle

- EU:n päästökauppajärjestelmä, mukaan lukien ETS1 ja ETS2, ovat voimassa vuoteen 2055 asti ja lisäksi jako EU:n päästökauppa- ja taakanjakosektorien kesken perustuu nykyiseen jakoon, mukaan lukien jätteenpolttolaitosten siirto taakanjakosektorille. Sen sijaan biomassaa yli 90 prosenttisesti käyttävien energialaitosten mahdollista siirtoa taakanjakosektorille ei huomioitu laskelmissa.
- ETS2:en sisällytettyjen toimialojen määrittely noudattaa komission ohjeistusta. ETS2-hinnoittelu otetaan siten käyttöön vuodesta 2027 lähtien ilman lykkäystä ja laajana. Maataloussektorin osalta on kuitenkin oletettu, että valtio kompensoi maataloussektorille kohdistuvat kustannukset, joten maatalouden KHK-päästöille ei ole mallinuksissa kohdistettu ETS2-hintavaikutuksia.
- Taakanjakosektorin päästövähennystavoitetta vuonna 2030 (Suomelle 50 % vertailuvuoteen 2005) ei oletettu WEM-skenaariossa, vaan tavoitteen saavuttamista tarkasteltiin laskelmien tulosten perusteella.
- Fossiilisten tuontipolttoaineiden hintakehitys hallintomalliasetuksen WEM-skenaarion mukaisesti. Kotimaisten energiahyödykkeiden hinnat endogeeniset, eli TIMES-VTT-mallinnukseen perustuva.
- EU:n ETS1:n ja ETS2:n päästöoikeuden hintakehitys EU:n hallintomalliasetuksen mukaisesti (EU:n WEM-skenaarion mukainen kehitys).
- Uusien ajoneuvojen CO₂-raja-arvot henkilö-, paketti-, linja- ja kuorma-autoille (EU 2023/851; COM(2023) 88 final)
- Vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuriasetus (AFIR; EU 2023/1804)
- EU:n F-kaasuasetus (517/2014) sekä moottoriajoneuvojen ilmastointijärjestelmien päästöistä annettu direktiivi (nk. MAC-direktiivi 2006/40/EC)

WEM-skenaarion laskentaan liitetty kansalliset toimet: Energiasektori, teollisuuden energia, liikenne, työkoneet ja rakennusten erillislämmitys sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen

- 1.1.2023 voimassa olleiden valmisteverotasojen oletetaan pysyvän (reaalisesti) ennallaan.
- Venäjän energiahyödykkeiden tuontikiellot voimassa koko tarkastelujakson ajan;
- Kivihiilen käytöstä luopuminen sähkön ja lämmön tuotannossa viimeistään vuonna 2029 tai aiemmin huomioiden julkisiin lähteisiin perustuvat tiedot energiayritysten ilmoittamista alasajoista ennen vuotta 2029;

- Turpeen käyttö mallinnettu markkinaehtoisesti, joten Sanna Marinin hallituksen tavoitetta turpeen käytön vähintään puolittamisesta vuoteen 2030 mennessä ei ole asetettu mallinnukseen rajoitteeksi;
- Biopolttoaineiden osuus tieliikenteen energiankulutuksesta vuosille 2022–2030: 12 %, 13,5 %, 28 %, 29 %, 29 %, 30 %, 31 %, 32 %, 34 % (446/2007). Jakeluvaikeus koskee tieliikenteeseen ja huviveneisiin jaeltavaa dieseliä, bensiiniä ja liikennekaasua, sekä bensiinikäyttöisiä työkoneita.
- Biopolttoöljyn jakeluvaikeus nousee 3 %:sta vuonna 2021 lineaarisesti 10 %:iin vuoteen 2028 mennessä (418/2019). Biopolttoöljyn käyttö kohdentuu polttoöljyn käyttöön rakennusten erillislämmityksessä, työkoneissa ja sisävesiliikenteessä.
- Sähkö- ja kaasukäyttöisten ajoneuvojen hankintatuet sekä muuntotuet myönnetyn rahoituksen mukaisesti.
- Tieliikenteessä vaikuttaa myös oletetusti etätyön ja HCT-kuljetusten sekä digitalisaation yleistymisen, vaikka varsinaisia kansallisia toimenpiteitä niiden edistämiseksi ei ole.
- Kaupunkiseutujen kehitys sekä kävelyn ja pyöräilyn investointiohjelmien vaikutuksen tieliikenteessä on huomioitu myönnetyn rahoituksen mukaisesti.
- Uudisrakentamisessa on siirrytty lähes nollaenergiarakentamiseen EU:n yhteisten tavoitteiden mukaisesti (Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi 2010/31/EU, EPBD. Direktiivin kansallinen toimeenpano ympäristöministeriön asetuksella 1010/2017)
- Korjausrakentamisessa on noudatettu energiatehokkuusvaatimuksia (ympäristöministeriön asetus 4/2013). Lisäksi on huomioitu vaatimustasoa pidemmälle viedyt energiatehokkuuden parannukset, jotka toteutuivat vuosina 2020–2023 ARAn kautta jaetulla avustuksella.
- Uusiutuvan energian osuus lämmitykseen käytettävästä energiasta vähintään 38 % (rakennuslain muutos 927/2021) sekä uusissa että laajamittaisesti korjattavissa rakennuksissa.
- Pääministeri Orpon hallitus päätti, että ARA:n ja ELY:n kautta jaettavia tukia kiinteistökohtaisesta öljylämmityksestä luopuville kotitalouksille, taloyhtiöille, kunnille ja kuntien omistamille liikelaitoksille ei jatketa, joten WEM-skenaarioiden mallinnuksessa öljylämmityksen ei oletettu poistuvan 95 prosenttisesti, vaan öljylämmityksestä luovutaan markkinaehtoisesti.
- Julkisille hankinnoille laaditut kriteerit HFC-yhdisteiden vaihtoehtoista; laitteissa ja tuotteissa olevien F-kaasuväestöjen hallinta ja talteenoton tehostaminen (Suomen ympäristökeskuksen raportti laitteisiin ja tuotteisiin varastoutuneiden F-kaasujen ja otsonikerrosta heikentävien aineiden määrästä); vaihtoehtoisten teknologioiden käyttöönotto koulutuksen ja tiedotuksen keinoin
- Kasvihuonekaasupäästöille asetettuja ilmastolain mukaisia vähennystavoitteiden saavuttamista (eli 60 % vuonna 2030, hiilineutraalius vuonna 2035, 80 % vuonna 2040 ja vähintään 90 % vuonna 2050 vuoden 1990 tasoon verrattuna) tarkastellaan mallinnuksen tuloksena.
- CAP27-suunnitelman 31.8.2022 politiikkatoimet tukevat osaltaan Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman toimeenpanoa, vaikutus 2023 alkaen.
 - Ehto: pellonraivaus sallittua vain pysyväksi nurmeksi.

- Ympäristökorvaus kosteikkojen hoitoon & ei-tuotannollinen investointituki kosteikkoinvestointeihin. Tukea voi saada vesiensuojelukosteikkojen lisäksi ilmastokosteikko, jossa vedenpinnan taso -5 – -10 cm. Tavoiteala 2027 vesiensuojelu- ja ilmastokosteikolle yhteensä 3000 ha, josta puolet ilmastokosteikkoa.
- Ympäristökorvaus valumavesien käsittelyyn happamilla sulfaattimailla ja turvemaiden maataloudessa: säätösalaoituksen hoitotoimenpiteet. Tavoiteala 2027 60 000 ha. Viljelijälle maksetaan vuotuisista kustannuksista 77 €/ha.
- Altakastelu ja kuivatusvesien kierrätys 12 000 ha. Viljelijälle maksetaan kustannuksista 214 €/ha vuodessa.
- Ympäristökorvaus kerääjäkasvien viljelyyn. Tavoiteala 2027 300 000 ha.
- Ympäristökorvaus maanparannus- ja saneerauskasvien viljelyyn. Tavoiteala 2027 100 000 ha.
- Ympäristökorvaus suojavyöhykkeisiin ja turvepeltojen nurmiin. Turvepeltojen nurmet -toimenpiteessä sitoumuskauden aikana nurmen saa uusia vain ilman muokkausta. Perustetaan alalle, jossa on edellisenä vuonna viljelty yksivuotista kasvia. Tavoiteala 2024 20 000 ha, 2025–2027 yhteensä molempiin 60 000 ha, sisältäen turvepeltojen nurmet toimenpiteen tavoitealan 20 000 ha.
- Ekokäytöksen viherlannoitusnurmi. Tavoiteala 2027 30 000 ha.
- Maatalousinvestoinnit: Ympäristön tilaa ja tuotannon kestävyyttä edistävät investoinnit. Tavoite vuoden 2027 loppuun mennessä 1,1 prosenttia tiloista eli yhteensä 500 tilaa.
- Ympäristösitoumuksen tilakohtainen toimenpide edistää täsmäviljelyä, joka hyväksytty toimenpide edellyttäen, että maatilalla on siihen sopivat koneet määritellyissä tapauksissa. Skenaarioissa on KAISU:n tavoitteiden mukaisesti oletettu, että typpilannoitus (sis. väkilannoitteet, lanta, muut orgaaniset lannoitteet) vähenee täsmäviljelyn ansiosta 5 % vuoteen 2030 ja 10 % vuoteen 2040 mennessä.
- Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelma (MISU)
 - Pellonraivauksen ehkäisy 800 ha/v kivennäismailla, 900 ha/v turvemaiden.
 - Joutoalueiden metsitys noin 3 000 ha/v.
 - Turvepeltojen metsitys 2000 ha/v 2025–2029.
 - Turvepeltojen nurmet 40 000 ha/v (nelivuotisessa viljelykierrrossa lisäistä nurmea 10 000 ha/v).
 - Turvepeltojen viljely (nurmi, ruokohelpi ym.) korotetulla vedenpinnalla (-30 cm) 25 000 ha v. 2030 ja 42 500 ha v. 2035.
 - Turvepeltojen viljely korotetulla vedenpinnalla (-5--10 cm) 2 500 ha v. 2030 ja 5 000 ha v. 2035.
 - Turvepellon ilmastokosteikko 4 000 ha v. 2030, 7 500 ha v. 2035.
 - Turvepeltojen vettäminen 10 000 ha v. 2030, suonpohjien vettäminen 20 000 ha v. 2030.
 - Metsähallituksen omistamien metsien lannoitus 30 000 ha/v.
 - Kivennäismaametsien lannoitus 50 000 ha/v.
 - Suometsien tuhkalanhoitus 37 000 ha/v.

- Kunnostusojituksen välttäminen, tavoite 1000 ha/v.
- Yläharvennukset rehevissä korvissa kiertoajan viimeisenä harvennuksena ennen uudistamista. Tavoite 6 000 ha/v.
- Uudistushakkuissa valittavien säästöpuiden määrä nostetaan 5:stä 7:ään m³.
- Peltojen hiilen sidontaa ja varastointia edistävien toimien tukeminen (m. luonnonhoito- ja viherlannoitusnurmet, kerääjäkasvit, maanparannus- ja saneerauskasvit). Kerääjäkasvi sekä viherlannoitus- ja biokaasunurmet on huomioitu KAISU:n tavoitepinta-alojen mukaisesti kuten HIISI-WAM-skenaariossa (Maanvilja ym. 2021, taulukko 3).

WAM-skenaarion laskentaan liitetty EU:n määrittelyt ja EU:n lisäiset toimet

- ETS1- ja ETS2-määrittelyt noudattavat KEITO-WEM-määrittelyitä ml. päästöoikeuden hintakehitys. Teknisten hiilinielujen osalta ei määritelty, tulisiko päästövähennykset kohdentaa päästökauppa-, taakanjako- tai jollekin muulle sektorille.
- Taakanjakosektorin päästövähennystavoitetta vuonna 2030 (Suomelle 50 % vertailuvuoteen 2005) ei oletettu KEITO-WAM-skenaariossa, vaan tavoitteen saavuttamista tarkasteltiin laskelmien tulosten perusteella.
- Fossiilisten tuontipolttoaineiden hintakehitys sama kuin KEITO-WEM-skenaariossa hallintomalliasetuksen mukaisesti. Kotimaisten energiahyödykkeiden hinnat endogeeniset, eli TIMES-VTT-mallinnukseen perustuva.
- EU:n ETS1:n ja ETS2:n päästöoikeuden hintakehitys EU:n hallintomalliasetuksen WEM-skenaarion mukaisesti. Hallintomalliasetuksen mukaan komission WAM-hintaskenaarioita ei ole välttämätöntä käyttää kansallisissa skenaariolaskelmissa.
- Uusien ajoneuvojen CO₂-raja-arvot henkilö-, paketti-, linja- ja kuorma-autoille samoin kuin WEM:ssä (EU 2023/851; COM(2023) 88 final)
- Vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuriasetus samoin kuin WEM:ssä (AFIR; EU 2023/1804).
- EPBD:n (2024) toimeenpano uusissa rakennuksissa: 7 artikla: kaikki uudet rakennukset päästöttömiä 2030 lähtien; 10 artikla: aurinkoenergian tuotantoa 2026 jälkeen yli 250 m² suuruisiin ei-asuinrakennuksiin ja 2029 jälkeen asuinrakennuksiin.
- EPBD:n (2024) toimeenpano olemassa olevissa rakennuksissa: 8 artikla: korjausrakentamisen vaatimukset; 9 artikla: ei-asuinrakennusten vähimmäisenergiatohokkuuden kynnysarvo 2030 ja 2033; asuinrakennusten keskimääräisen kulutuksen vähennykset 2030 ja 2035. 10 artikla: aurinkoenergian tuotannon vaatimus julkisille rakennuksille; asteittain 2027, 2028 ja 2030 sekä laajamittaisille korjauksille 2027 lähtien.
- Uudistettu F-kaasuasetus (EU) (2024/574).

WAM-skenaarion laskentaan liitetyt kansalliset toimet: Energiasektori, teollisuuden energia, liikenne, työkoneet ja rakennusten erillislämmitys sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen

- Liikennepolttoaineiden valmisteveron alennus vuoden 2024 alusta bensiinille 3,9 snt/litra ja dieselille 3,8 snt/litra (HE 2023). Jaksolla 2024-2027 valmisteveroihin ei lisäksi kohdisteta indeksitarkistusta.
- Ajoneuvoveron perusveron alennus -35 milj. € vuoden 2027 tasossa (kohdistuu vanhimpiin NEDC-mittaustavan polttomoottoriautoihin sekä autoihin, joilla ei ole päästömittausta) (HE 2023)
- Dieselin ja kaasun verotuen asteittainen poistaminen verotasoja korottamalla vuoteen 2035 mennessä. Tällä hallituskaudella verotuen alennus dieselille tasolta 26 snt/litra tasolle 18 snt/litra ja vastaavasti liikennekaasun verotuen alennus tasolta 50 €/MWh tasolle 18 €/MWh. Verotuottovaikutus vuoden 2027 tasossa 120 milj. €.
- Ammattidieselin käyttöönotto vuodesta 2027. Ammattidieselin käyttöönoton on oletettu kompensoivan em. dieselin verotuen poiston.
- Sähköautojen ja lataushybridien ajoneuvoveron korotus sekä nollapäästöisten työsuhdeautojen verotuen jatkaminen neljällä vuodella (2029 loppuun). Verotuotto +20 milj. € vuoden 2026 tasossa
- Matkailuautojen käyttövoimaveron korottaminen vuodesta 2026. Verotuottovaikutus + 7 milj. € vuoden 2027 tasossa.
- Raskaan kaluston hankintatuki mikroyrityksille huomioitu epäsuorasti Traficom:in arvion mukaan käyttövoimien kehitysarvioissa.
- Matkailu-, paketti- ja kevyiden kuorma-autojen energiaverotuen poistaminen käyttövoimaveron korottamalla vuodesta 2026. Verotuottovaikutus +130 M€
- Tieliikenteen jakeluvelvoitteen maltillistaminen 2024-2027: 13,5 % 2024; 16,5 % 2025; 19,5 % 2026; 22,5 % 2027. Tämä jälkeen nousee lineaarisesti 30 % -tasoon vuonna 2030.
- Kevyen polttoöljyn bio-osuuden korotus taakanjakosektorilla (työkoneet, rakennusten erillislämmitys, ETS1:n ulkopuolinen teollisuus): jakeluvelvoitteen nostaminen 30 %:iin vuoteen 2030 mennessä siten, että jakeluvelvoite nousisi vuodesta 2026 alkaen joka vuosi tasaisesti 4,6 prosenttiyksiköllä, ollen 11,6 % vuonna 2026, 16,2 % vuonna 2027 ja 20,8 % vuonna 2028. Vuonna 2029 jakeluvelvoite olisi 25,4 % ja vuonna 2030 30 %.
- Suurten teollisten investointien verohyvitys (maksimissaan 150 M€/hanke): huomioitu ainoastaan epäsuorasti eksogeenisten teollisten investointioletusten kautta.
- Ilman hiilidioksidin talteenottoa tapahtuva kiinteän biomassan polton energiaverotuen supistaminen yli 20 MW:n laitoksissa vuodesta 2030 lähtien siten, että verotasot vastaisivat nykyistä energiaveromallia eli energiasisältövero 5,7 €/MWh erillislämmöntuotannolle ja 2,7 €/MWh yhdistetylle tuotannolle.
- Teollisuuden vety/RFNBO-ohjelma: REDIII edellyttää 42 % RFNBO-osuutta teollisuuden vedyn käytöstä. Huomioitu ainoastaan epäsuorasti olettamalla eksogeeniset teollisuuden investoinnit uusiutuvaan vetyyn.
- Kansallinen tavoite merituulivoimalle huomioitu ainoastaan epäsuorasti asettamalla eksogeeninen minimitaso merituuli-investoinneille.
- Pienydinvoimaloiden investointien edistäminen huomioitu ainoastaan epäsuorasti olettamalla eksogeeniset SMR-investoinnit.

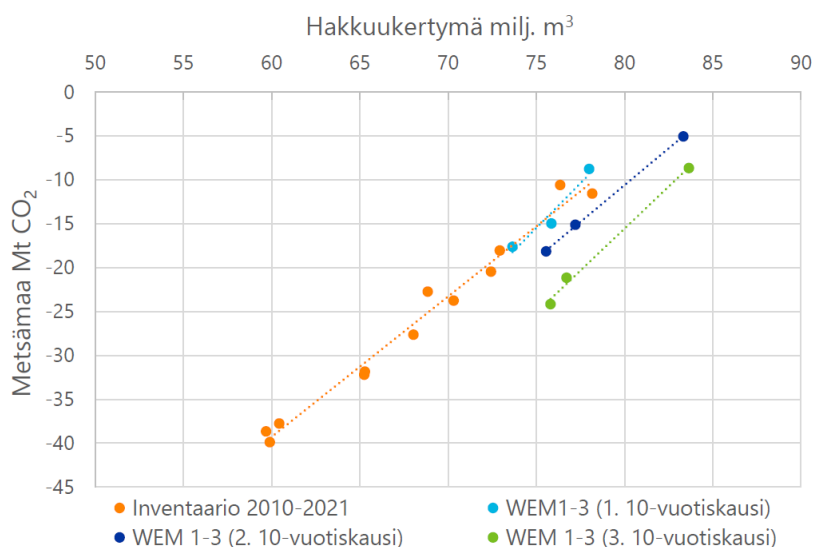
- Teknisten hiilinielujen, eli negatiivisten päästöjen edistäminen huomioitu lähinnä epäsuorasti olettamalla eksogeeniset maksimi-investointitasot. Lisäksi BECCS-laitoksille ei kohdisteta bioenergiaveroa.
- Metsitetään heikkotuottoisia metsitykseen soveltuvia peltoja hieman perusuraa enemmän, 2400 ha/v vuosina 2025–2029.
- Ennallistamisasetuksen toimeenpanon myötä turvepeltojen vettämisalajat kasvavat perusuraan verrattuna 22 500 ha. Vuoteen 2035 mennessä turvepeltojen vettämiseen ja ilmastokosteikoihin ohjataan yhteensä 40 000 ha v. Myös kosteikkoviljelyala, jossa pohjaveden pinta on -30 cm tasolla, kasvaa 12 500 hehtaarilla, jolloin sen kokonaisala on 55 000 ha vuoteen 2035 mennessä.
- Lypsylehmien rehunkulutuksen mittaamiseen investoiminen tehostaa jalostusta, mikä puolestaan parantaa lypsylehmien maitotuotosta kulutettua rehuannosta kohden. Vuonna 2025 lypsylehmien bruttoenergian tarve maitokiloa kohden on 2 prosenttia pienempi verrattuna perusuraan. Tämän jälkeen lehmien energiatehokkuus paranee lineaarisesti siten, että vuoteen 2050 mennessä bruttoenergian tarve on 5 prosenttia perusuraa pienempi.
- Liharotureistytysten ja sukupuolilajitellun siemenen käytön lisääminen tehostaa lihan tuotantoa lypsykarjassa ja vähentää emolehmien tarvetta. Liharotuisten sonnien siemenen käyttö lypsykarjassa kasvaa lineaarisesti nykyisestä 31 prosentin osuudesta 80 prosenttiin vuoteen 2055 mennessä. Samalla sukupuolilajitellun siemenen käyttö lisääntyy siten, että parhaat lypsyrotuiset hiehot siemennetään vuoteen 2055 mennessä aina X-lajitellulla siemenellä, ja liharoturisteytyksiin käytetystä siemenestä 50 prosenttia on Y-lajiteltua.
- 3NOP-rehulisäaineen käyttö lypsylehmien ruokinnassa yleistyy, ja sitä aletaan antaa kaikille eläinryhmille, joille sen käyttö on nykyisin sallittua. Näihin kuuluvat lypsylehmät sekä yli 17 kuukauden ikäiset, maidontuotantoon kasvatettavat hiehot, jotka eivät ole luomutuotannossa.
- Nopeutettu siirtymä luonnollisiin kylmäaineisiin (vihreiden julkisten ja yksityisten hankintojen kriteereiden päivitys; edistetään talotekniikkaan ja rakennusmääräyksiin liittyvien normistojen ja standardien yhtenäistämistä luonnolliset kylmäaineet mahdollistavaan suuntaan, kuitenkin siten, että turvallisuusnäkökohdat otetaan huomioon) ja kylmäaineiden elinkaarisen hallinnan edistäminen (laaditaan kylmäaineiden elinkaarisen hallinnan kansallinen toimintasuunnitelma; tuottajavastuun edistäminen, tietopohjan vahvistaminen mm. uudistamalla VNA 766/2016)

Liite C. Puusto- ja maaperälaskennan uudistukset maankäyttösektorin skenaarioissa

1. Metsien puustonieluvario

Aiemmissa skenaarioissa MELA-ohjelmiston tuottama puuston hiilinieluvario perustui biomassavaraston laskentakausien väliseen muutokseen. Nyt tuotetuissa skenaarioissa MELA-ohjelmiston tuottama laskentakauden runkotilavuuden kasvu ja poistuma muunnetaan ensin biomassakasvuksi ja -poistumaksi kasvihuonekaasuinventaarion käyttämällä biomassan muutokertoimilla ja hiilinieluvario lasketaan tämän jälkeen biomassakasvun ja -poistuman erotuksena.

Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman (MISU) skenaariopäivitys nosti esiin MELA-ohjelmistolla tuotettujen ja kasvihuonekaasuinventaarion raportoimien metsämaan (metsien) hiilinielujen välisen eron (Kuva Liite C 1). Raporttiin sisältyvästä kuvasta näkyy, miten MELA-ohjelmistolla tuotetuissa WEM-skenaarioissa metsämaan hiilinielu oli 75–78 miljoonan kuution hakkuukertymillä laskennan ensimmäisen 10-vuotiskauden jälkeen 3–10 Mt CO₂ suurempi kuin kasvihuonekaasuinventaarion samoilla hakkuukertymillä raportoima hiilinielu.

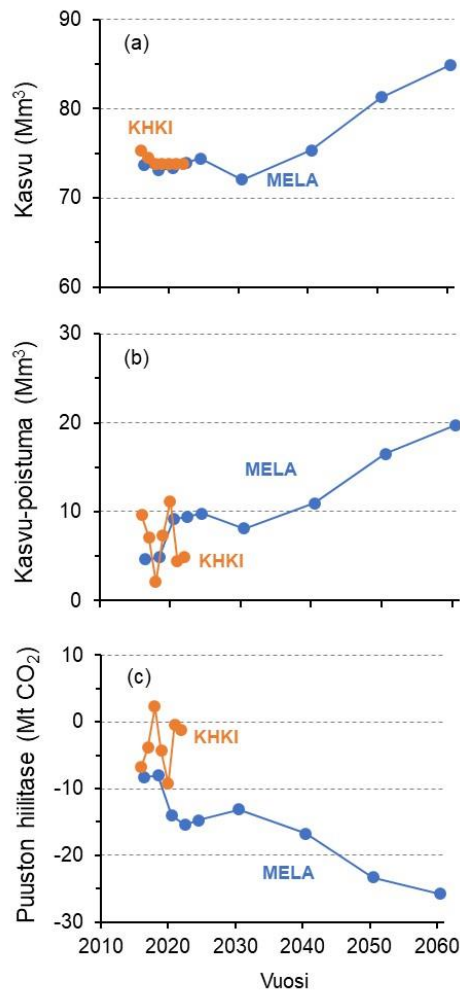


Kuva 7. Runkopuun hakkuukertymän (Mm³) ja metsämaan CO₂-nielun (Mt CO₂) suhde kasvihuonekaasuinventaarion tuloksissa (vuodet 2010–2021, oranssi) ja skenaariomallinnusten kolmella ensimmäisellä 10-vuotiskaudella (WEM1-3 ensimmäinen 10-vuotiskausi, vaaleansininen; WEM1-3 toinen 10-vuotiskausi, tummansininen; WEM1-3 kolmas 10-vuotiskausi, vihreä).

Kuva Liite C 1. Hakkuukertymän ja metsämaan hiilinielun välinen suhde kasvihuonekaasuinventaarion raportoimissa tuloksissa ja MELA-ohjelmistolla tuotetuissa WEM-skenaarioissa (kuvan lähde: Silfver ym. 2024. Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman skenaariotarkastelun päivitys. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 4/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-869-0>).

Havaitun eron syytä selvitetiin tuottamalla MELA-ohjelmistolla metsänieluskenaario vuosille 2016–2022 ja vertaamalla skenaarion tuloksia vastaavien vuosien kasvihuonekaasuinventaarion raportoimaan metsänieluun. MELA-skenaariossa käytettiin rajoitteena vuosien 2016–2022 tilastoituja hakkuukertymiä ja se toteutettiin kahden vuoden laskentakausina. Skenaariot laskettiin kasvihuonekaasuinventariota seuraten Etelä- että Pohjois-Suomelle erikseen. Tässä tarkastelussa keskitytään Etelä-Suomen tuloksiin.

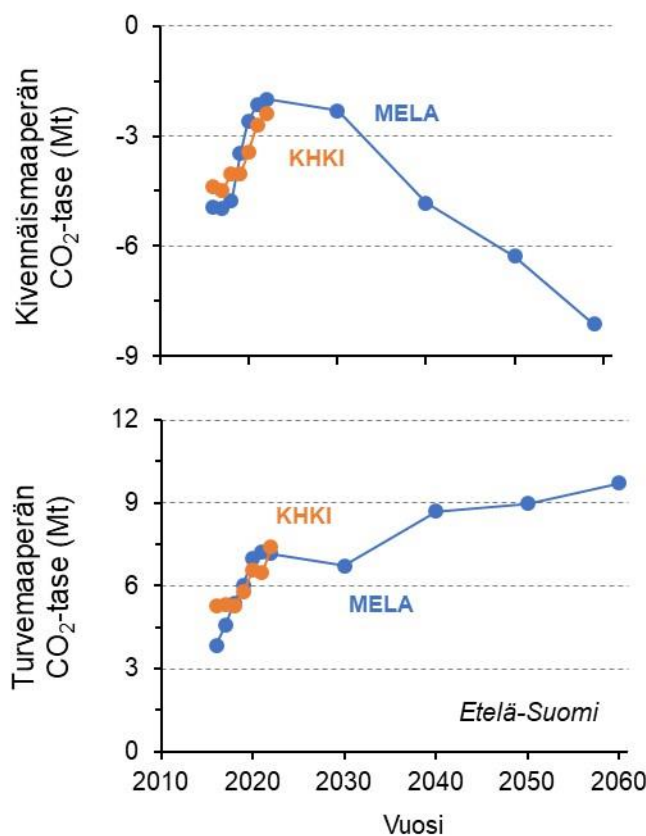
Puustotuloksissa (Kuva Liite C 2) Etelä-Suomen runkotilavuuden kasvu, ja kasvun ja poistuman erotus osuivat hyvin yksiin MELA-skenaarion ja inventaarion välillä: kasvun osalta eroa oli vertailukauden aikana keskimäärin 0,6 miljoonaa kuutiota vuodessa (Kuva 2a), kasvun ja poistuman erotuksen osalta keskimäärin 0,3 miljoonaa kuutiota vuodessa (Kuva Liite C 2b). Inventaariotuloksissa kasvun ja poistuman erotus vaihtelee voimakkaasti vuodesta toiseen, koska vuosittaiset hakkuutasot vaihtelevat, MELA-skenaariossa kahden vuoden laskentakaudet tasaavat vaihtelua.



Kuva Liite C 2. MELA-ohjelmiston tuottama ja kasvihuonekaasuinventaarion (KHKI) vuosille 2016–2022 raportoima Etelä-Suomen puuston (a) runkotilavuuden kasvu, (b) runkotilavuuden kasvun ja poistuman erotus, ja (c) hiilitase. Vuosille 2016–2022 MELA-skenaariossa käytettiin rajoitteena kyseisten vuosien tilastoituja hakkuukertymiä. Skenaario toteutettiin kahden vuoden laskentakausina (skenaariota jatkettiin 10 vuoden laskentakausilla ja viimeisen kaksivuotiskauden hakkuurajoitteella vuoteen 2060 asti). MELA-skenaariossa hiilitase laskettiin laskentakausien välisistä biomassavaraston muutoksista.

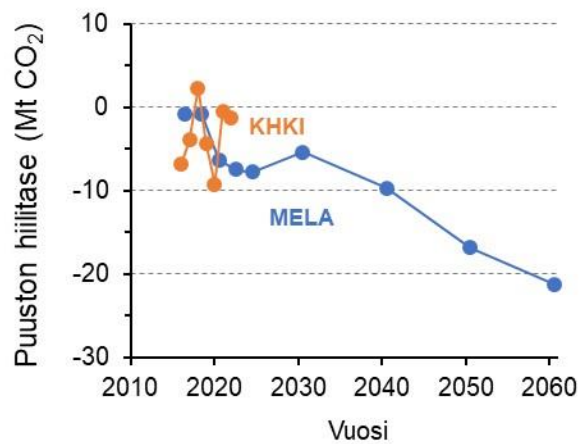
Puuston hiilitaseessa eroa oli huomattavasti enemmän: MELA-ohjelmiston tuottama vuotuinen hiilinielu oli keskimäärin 8,1 Mt CO₂ suurempi kuin inventaariossa raportoitu hiilinielu (Kuva Liite C 2c). Tulokset osoittavat, että MELA-ohjelmiston tuottama arvio kasvun ja poistuman erotuksesta sopi hyvin yhteen inventaariotuloksen kanssa, kun tulos perustui runkotilavuuksiin (Kuva Liite C 2b), mutta ei enää, kun kyseessä olivat biomassoihin perustuvat hiilitasetulokset (Kuva Liite C 2c).

Metsien kivennäis- ja turvemaaperien CO₂-taseissa ei ollut MELA-skenaarion ja kasvihuonekaasuinventaarion raportoimien tulosten välillä merkittävää eroa (Kuva Liite C 3). Maaperien CO₂-taseet lasketaan skenaarioissa kasvihuonekaasuinventaarion käyttämin menetelmin, ainoastaan laskentaan tarvittavat puustotiedot tuotetaan MELA-ohjelmistolla.



Kuva Liite C 3. MELA-ohjelmiston tuottama ja kasvihuonekaasuinventaarion (KHKI) raportoima Etelä-Suomen kivennäis- ja turvemaaperien CO₂-tase vuosille 2016–2022. MELA-skenaarion yksityiskohdat kuten kuvassa 2.

Vuosille 2016–2022 tuotetussa MELA-skenaariossa biomassan muutosarvio (josta puuston hiilitase johdettiin) perustui aiempien skenaariolaskelmien tapaan laskentakausien väliseen biomassavaraston muutokseen, kun taas kasvihuonekaasuinventaariorissa puuston kasvun ja poistuman runkotilavuudet muunnetaan biomassoiksi biomassan muuntokertoimilla ja puuston hiilitase on biomassakasvun ja -poistuman erotus. Kun MELA-skenaariossakin sovellettiin inventaarion käytäntöä ja runkopuun kasvu ja poistuma muunnettiin biomassaksi inventaarion käyttämillä muuntokertoimilla ja hiilitase laskettiin biomassakasvun ja -poistuman erotuksena, ero MELA-skenaarion ja inventaariotulosten välillä pieneni ja oli keskimäärin vain 0,5 Mt CO₂ vuodessa (Kuva Liite C 4).



Kuva Liite C 4. MELA-ohjelmiston tuottama ja kasvihuonekaasuinventaariorin (KHKI) vuosille 2016–2022 raportoima Etelä-Suomen puuston hiilitase, kun MELA-skenaariossakin runkopuun kasvu ja poistuma muunnettiin biomassaksi inventaariorin käyttämillä muuntokertoimilla ja hiilitase laskettiin biomassakasvun ja -poistuman erotuksena.

Vuosien 2016–2022 tarkastelu osoittaa, että MELA-ohjelmiston ja kasvihuonekaasuinventaariorin tuottamien tulosten välistä tasoeroa (Kuvat Liite C 1 ja Liite C 2) on mahdollista kuroa umpeen siirtymällä MELA-skenaariossa biomassan varastonmuutosmenetelmästä inventaariorin käyttämiin biomassan muuntokertoimiin ja kasvun ja poistuman erotukseen (Kuva Liite C 4). Tämä menetelmämuutos otettiin käyttöön nyt tuotetuissa skenaarioissa.

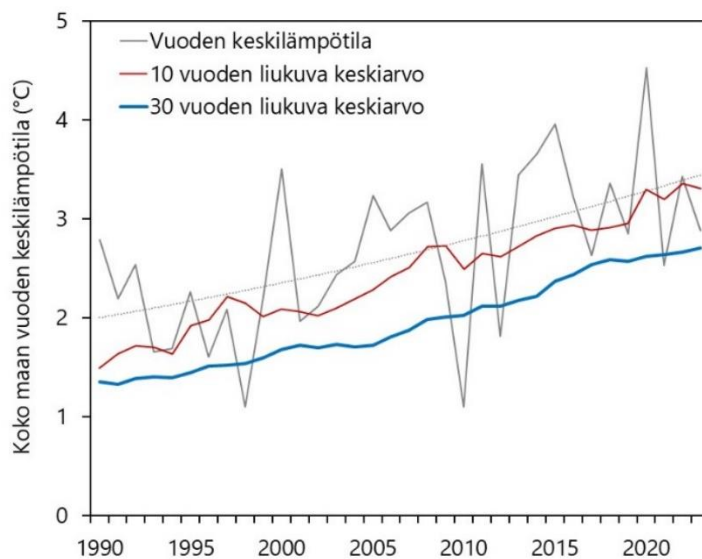
2. Skenaariovuosien säätö

Aiemmissa skenaarioissa skenaariovuosien säätölle käytettiin 30 viime vuoden keskiarvoa. Nyt tuotetuissa skenaarioissa skenaariovuosien säätölle käytetään 10 viime vuoden keskiarvoa.

Kasvihuonekaasuinventaariossa maaperän hiilivarastomuutokset lasketaan metsissä ja kivennäismaapelloilla malleilla, joissa kuolleen orgaanisen aineksen hajotukseen vaikuttavat sadanta ja ilman lämpötila. Jotta vuosien väliset säätvaihtelut eivät sellaisinaan heijastu inventaariotuloksiin, laskennoissa käytetään säämuuttujista 30 vuoden liukuvaa keskiarvoa. Pitkä keskiarvo tasaa sääoloiltaan poikkeuksellisten vuosien vaikutusta, mutta ei kuitenkaan poista ilmastossa tapahtuvaa pidemmän aikavälin muutosta. Esimerkiksi kuvassa Liite C 5 vuoden keskilämpötilojen ja 30 vuoden liukuvan keskiarvon ajallinen trendi (ilmastonmuutos) on vuosina 1990–2023 hyvin samansuuntainen.

Kasvihuonekaasuinventaarion käytäntöä mukaillen aiemmissa ilmastoskenaarioissakin tulevien vuosien sadannan ja lämpötilan ennusteina käytettiin 30 viime vuoden keskimääräistä sadantaa ja lämpötilaa. Lämpenevässä ilmastossa lämpötilojen 30 viime vuoden keskiarvo on kuitenkin systemaattisesti alhaisempi kuin keskilämpötilojen pitkän aikavälin trendi (Kuva Liite C 5) ja siten (hyvin todennäköisesti) aliarvioi tulevien vuosien keskimääräistä lämpötilaa. Tästä syystä skenaariovuosien lämpötilaennusteeksi vaihdettiin keskilämpötilojen pitkän aikavälin trendiä paremmin seuraava 10 viime vuoden keskiarvo (Kuva Liite C 5). Koska lämpötilojen oletetaan skenaariovuosina pysyvän viimeisen 10 vuoden keskimääräisellä tasolla, ilmaston ei skenaarioissa edelleenkään oleteta lämpenevän nykyisestä.

Vaikka ilmastonmuutos ei sadannassa aiheuta yhtä selkeää pitkän aikavälin muutosta kuin lämpötiloissa, yhdenmukaisuuden vuoksi myös sadannan ennusteissa siirryttiin 10 viime vuoden keskiarvoon.



Kuva Liite C 5. Koko Suomen vuoden keskilämpötila ja sen 10 ja 30 vuoden liukuva keskiarvo. Harmaa katkoviiva on keskilämpötilojen lineaarinen trendi vuosille 1990–2023.

Liite D. Maankäytön muutokset

Taulukko Liite D 1. WEM-skenaario. Maankäytön muutokset 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050 ja 2055 (ha/v) sekä kokonaismuutosala skenaariovuosina 2024–2055 (ha).

Nykyinen maankäyttö	Maaperä ¹⁾	Muutosta edeltävä maankäyttö	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2024-2055
ha/v										
Metsämaa	min.	Viljelysmaa	310	310	310	310	310	310	310	9 920
	org.		1 990	190	190	190	190	190	190	15 080
	min.	Ruohikkoalueet	2 610	2 610	2 610	2 610	2 610	2 610	2 610	83 520
	org.		590	590	590	590	590	590	590	18 880
Rakennettu maa			1 570	1 570	1 570	1 570	1 570	1 570	1 570	50 240
Kosteikko, muu			1 830	1 830	1 830	1 830	1 830	1 830	1 830	58 560
Turvetuotanto			2 250	3 680	3 250	1 020	600	20	0	47 350
Viljelysmaa	min.	Metsämaa	480	480	480	480	480	480	480	15 360
	org.		500	500	500	500	500	500	500	16 000
	min.	Ruohikkoalueet	250	250	250	250	250	250	250	8 000
	org.		90	90	90	90	90	90	90	2 880
	min.	Kosteikko, muu	10	10	10	10	10	10	10	320
	org.	Kosteikko, muu	90	90	90	90	90	90	90	2 880
yht.			540	880	770	240	140	0	0	11 230
Ruohikkoalueet	min.	Metsämaa	470	470	470	470	470	470	470	15 040
	org.		270	270	270	270	270	270	270	8 640
	min.	Viljelysmaa	2 250	2 250	2 250	2 250	2 250	2 250	2 250	72 000
	org.		280	280	280	280	280	280	280	8 960
yht.			120	190	160	60	40	10	10	2 590
Rakennettu maa	yht.	Metsämaa	8 380	8 330	6 570	5 020	4 980	4 870	5 040	196 630
		Viljelysmaa	500	530	390	310	310	300	320	12 060
Ruohikkoalueet			120	120	100	80	80	80	80	3 050
Muu maa			390	330	300	200	190	170	190	7 880
Kosteikko, muu			180	180	150	110	110	110	110	4 350

		Turvetuotanto	60	180	0	10	10	10	10	1 220
Kosteiko, muu	org.	Metsämaa	960	960	960	960	960	960	960	30 720
		Viljelysmaa	1 810	2 270	700	0	0	0	0	17 550
		Ruohikkoalueet	90	90	90	90	90	90	90	2 880
		Turvetuotanto	2 860	2 860	390	210	80	30	0	23 570
Turvetuotanto		Metsämaa	80	80	80	30	0	0	0	1 110
		Kosteikko, muu	20	20	20	10	0	0	0	290
Sisävedet		Turvetuotanto	160	200	380	210	80	30	0	4 820

¹⁾ Nykyisellä maankäytöllä

Taulukko Liite D 2. WAM-skenaario. Maankäytön muutokset 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050 ja 2055 (ha/v) sekä kokonaismuutosala skenaariovuosina 2024–2055 (ha).

Nykyinen maankäyttö	Maaperä ¹⁾	Muutosta edeltävä maankäyttö	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2024–2055
ha/v										
Metsämaa	min.	Viljelysmaa	310	310	310	310	310	310	310	9920
	org.		2590	190	190	190	190	190	190	18080
	min.	Ruohikkoalueet	2610	2610	2610	2610	2610	2610	2610	83520
	org.		590	590	590	590	590	590	590	18880
	yht.	Rakennettu maa	1570	1570	1570	1570	1570	1570	1570	50240
	org.	Kosteikko, muu	1830	1830	1830	1830	1830	1830	1830	58560
	yht.	Turvetuotanto	2250	3700	3360	900	630	30	0	47600
Viljelysmaa	min.	Metsämaa	480	480	480	480	480	480	480	15360
	org.		500	500	500	500	500	500	500	16000
	min.	Ruohikkoalueet	250	250	250	250	250	250	250	8000
	org.		90	90	90	90	90	90	90	2880
	min.	Kosteikko, muu	10	10	10	10	10	10	10	320
	org.		90	90	90	90	90	90	90	2880
	yht.	Turvetuotanto	540	890	800	210	150	10	0	11380
Ruohikkoalueet	min.	Metsämaa	470	470	470	470	470	470	470	15040
	org.		270	270	270	270	270	270	270	8640
	min.	Viljelysmaa	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250	72000

	org.		280	280	280	280	280	280	280	8960
	yht.	Turvetuotanto	120	190	170	50	40	10	10	2590
Rakennettu maa	yht.	Metsämaa	8380	8260	6490	5010	4920	5000	5040	196250
	yht.	Viljelysmaa	500	510	380	310	300	310	320	12000
	yht.	Ruohikkoalueet	120	120	100	80	80	80	80	3050
	yht.	Muu maa	390	330	280	200	190	200	190	7920
	yht.	Kosteikko, muu	180	180	150	110	110	110	110	4350
	yht.	Turvetuotanto	60	150	0	0	0	0	0	900
Kosteiko, muu	org.	Metsämaa	960	960	960	960	960	960	960	30720
	org.	Viljelysmaa	1810	2270	5200	0	0	0	0	40050
	org.	Ruohikkoalueet	90	90	90	90	90	90	90	2880
	yht.	Turvetuotanto	2860	2860	380	210	70	30	0	23470
Turvetuotanto	org.	Metsämaa	80	80	80	30	0	0	40	1310
	org.	Kosteikko, muu	20	20	20	10	0	0	30	440
Sisävedet	yht.	Turvetuotanto	160	210	380	210	70	30	0	4820

¹⁾ Nykyisellä maankäytöllä

Liite E. Metsävaraskenaarioiden tulokset koko Suomessa

Taulukko Liite E 1. WEM-skenaario

Laskelma: WEM

Alue: Koko Suomi

Pinta-alat ja puuston runkotilavuudet ovat vuosien 2019, 2029, 2039, 2049 ja 2059 alun tilatietoja.

Kausittaiset tiedot (mm. kasvut ja poistumat) ovat kymmenvuotisjaksojen vuotuisia keskiarvotietoja.

METSÄ- JA KITUMAA					
VUOSI	2019	2029	2039	2049	2059
Pinta-ala, milj. ha	22,80	22,80	22,80	22,80	22,80
Metsämaa	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17
Ensisijaisesti puuntuotannossa	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06
Rajoitetussa puuntuotannossa	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Puuntuotannon ulkopuolella	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
Kitumaa	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
Kivennäismaa	15,90	15,90	15,90	15,90	15,90
Turvemaa	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90
Puuston runkotilavuus, milj. m³	2 511,3	2 658,7	2 766,3	2 904,5	3 078,2
Mänty	1 258,4	1 328,7	1 367,8	1 411,5	1 493,7
Kuusi	763,8	823,1	861,4	902,2	940,0
Lehtipuu	489,1	506,9	537,1	590,7	644,5
Kivennäismaa	1 880,2	1 996,9	2 095,5	2 234,3	2 427,4
Mänty	924,9	979,4	1 021,2	1 073,1	1 172,4
Kuusi	605,5	647,8	674,1	707,7	748,4
Lehtipuu	349,7	369,7	400,2	453,6	506,6
Turvemaa	631,1	661,9	670,8	670,1	650,7
Mänty	333,5	349,4	346,6	338,5	321,3
Kuusi	158,3	175,3	187,3	194,5	191,6
Lehtipuu	139,4	137,2	136,9	137,1	137,9
Säästöpuut	34,9	74,2	118,4	167,0	218,4
KAUSI	2019- 2028	2029- 2038	2039- 2048	2049- 2058	
Runkopuun kasvu, milj. m³/v	103,7	103,0	106,1	110,7	
Runkopuun kokonaispoistuma, milj. m³/v ¹⁾	89,0	92,3	92,3	93,4	

¹⁾ Sisältää hakkuissa, taimikonhoidossa ja raivauksessa kaadetun sekä luonnonpoistumana kuolleen puuston runkotilavuuden.

PUUNTUOTANNOSSA OLEVA METSÄMAA				
KAUSI	2019- 2028	2029- 2038	2039- 2048	2049- 2058
Runkopuun hakkuukertymä, milj. m³/v	77,4	81,9	81,0	80,5
Kasvatushakkuu	17,7	26,1	28,1	29,9
Uudistushakkuu	59,7	55,9	52,9	50,6
Ainespuukertymä, milj. m³/v	67,1	70,1	69,7	69,9
Mänty	32,7	34,2	33,4	31,8
Kuusi	23,8	26,0	26,4	28,1
Lehtipuu	10,6	10,0	9,9	10,0
Tukkikertymä ²⁾	30,5	33,6	33,6	33,6
Mänty	15,7	16,9	16,8	16,0
Kuusi	13,4	15,4	15,4	16,2
Lehtipuu	1,4	1,4	1,4	1,3
Kuitukertymä ²⁾	36,6	36,6	36,2	36,4
Mänty	16,9	17,3	16,7	15,8
Kuusi	10,5	10,6	11,0	11,9
Lehtipuu	9,2	8,6	8,5	8,7
Energiapuukertymä, milj. m³/v	15,6	17,1	16,6	16,1
Runkopuu	10,3	11,8	11,3	10,5
Oksat, lehdet ja neulasen, kannot ja juuret	5,3	5,3	5,3	5,6
Hakkuupinta-ala, 1 000 ha/v	568,1	651,5	624,7	634,6
Kasvatushakkuu	288,4	416,1	416,0	447,2
josta yläharvennuksia rehevissä korvissa ³⁾	3,2	6,0	5,8	5,4
Uudistushakkuu	279,7	235,4	208,7	187,5
Kivennäismaa	413,6	474,0	462,7	475,9
Turvemaa	154,6	177,6	162,0	158,7
Lannoitusala, 1 000 ha/v ⁴⁾	55,2	93,4	93,2	93,2
Kivennäismaa	35,7	58,8	61,9	66,4
Turvemaa	19,6	34,5	31,4	26,8
Kunnostusojitusala, 1 000 ha/v ⁵⁾	21,6	22,8	21,0	16,2

²⁾ Laskentateknisistä seikoista johtuen tukki- ja kuitukertymän arviot ovat vain suuntaa antavia.

³⁾ Yläharvennus oli mahdollinen vain viimeisenä pohjapinta-alaohjeisiin perustuvana harvennuksena kiertoajan kuluessa.

⁴⁾ Lannoitusala laskennallisen lannoituskäsitteilyn mukaan. Tämän lisäksi kaikissa skenaarioissa kasvumallien kalibroituun kasvuntasoon sisältyy kalibroitajakson aikana tehtyjen kasvatuslannoitusten vaikutus (koko Suomessa runsas 23 000 hehtaaria vuodessa).

⁵⁾ Kunnostusojitusalat on ilmoitettu harvennushakkuiden yhteydessä toteuttavien ojitusten osalta.

Taulukko Liite E 2. WAM-skenaario (ei käytetty maankäyttösektorin WAM-skenaariossa)

Laskelma: WAM

Alue: Koko Suomi

Pinta-alat ja puuston runkotilavuudet ovat vuosien 2019, 2029, 2039, 2049 ja 2059 alun tilatietoja.

Kausittaiset tiedot (mm. kasvut ja poistumat) ovat kymmenvuotisjaksojen vuotuisia keskiarvotietoja.

METSÄ- JA KITUMAA					
VUOSI	2019	2029	2039	2049	2059
Pinta-ala, milj. ha	22,80	22,80	22,80	22,80	22,80
Metsämaa	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17
Ensisijaisesti puuntuotannossa	17,02	17,02	17,02	17,02	17,02
Rajoitetussa puuntuotannossa	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
Puuntuotannon ulkopuolella	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Kitumaa	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
Kivennäismaa	15,90	15,90	15,90	15,90	15,90
Turvemaa	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90
Puuston runkotilavuus, milj. m³	2 511,3	2 659,2	2 759,8	2 880,0	3 028,0
Mänty	1 258,4	1 375,1	1 430,4	1 456,9	1 499,8
Kuusi	763,8	793,1	820,7	875,9	932,9
Lehtipuu	489,1	490,9	508,7	547,2	595,2
Kivennäismaa	1 880,2	2 024,7	2 182,0	2 301,1	2 420,0
Mänty	924,9	1 035,4	1 125,4	1 156,0	1 192,4
Kuusi	605,5	622,4	665,6	716,7	756,0
Lehtipuu	349,7	366,8	391,1	428,4	471,6
Turvemaa	631,1	631,1	634,5	577,8	578,9
Mänty	333,5	339,7	305,1	300,9	307,5
Kuusi	158,3	170,7	155,2	159,2	177,0
Lehtipuu	139,4	124,1	117,6	118,8	123,6
Säästöpuut	34,9	74,7	121,2	171,7	223,5
KAUSI	2019- 2028	2029- 2038	2039- 2048	2049- 2058	
Runkopuun kasvu, milj. m³/v	103,6	102,4	105,0	110,0	
Runkopuun kokonaispoistuma, milj. m³/v ¹⁾	88,8	92,4	93,0	95,2	

¹⁾ Sisältää hakkuissa, taimikonhoidossa ja raivauksessa kaadetun sekä luonnonpoistumana kuolleen puuston runkotilavuuden.

PUUNTUOTANNOSSA OLEVA METSÄMAA				
KAUSI	2019- 2028	2029- 2038	2039- 2048	2049- 2058
Runkopuun hakkuukertymä, milj. m³/v	77,2	81,7	81,2	80,9
Kasvatushakkuu	13,5	21,1	21,7	25,5
Uudistushakkuu	63,7	60,5	59,6	55,4
Ainespuukertymä, milj. m³/v	68,0	70,4	70,8	71,0
Mänty	28,9	33,0	34,7	33,5
Kuusi	26,8	26,4	24,5	26,0
Lehtipuu	12,2	11,1	11,7	11,5
Tukkikertymä ²⁾	32,3	34,7	34,5	34,7
Mänty	14,0	16,7	18,1	17,3
Kuusi	16,1	15,8	13,9	15,2
Lehtipuu	2,2	2,2	2,4	2,3
Kuitukertymä ²⁾	35,7	35,7	36,3	36,3
Mänty	14,9	16,3	16,6	16,2
Kuusi	10,7	10,5	10,5	10,8
Lehtipuu	10,0	8,9	9,2	9,3
Energiapuukertymä, milj. m³/v	15,5	16,9	16,9	16,5
Runkopuu	9,3	11,3	10,4	9,8
Oksat, lehdet ja neulasen, kannot ja juuret	6,3	5,6	6,5	6,6
Hakkuupinta-ala, 1 000 ha/v	524,9	599,7	576,7	586,8
Kasvatushakkuu	235,4	343,7	350,1	393,5
josta yläharvennuksia rehevissä korvissa ³⁾	2,6	5,5	4,5	4,4
Uudistushakkuu	289,5	256,0	226,7	193,2
Kivennäismaa	345,5	399,0	421,1	454,2
Turvemaa	179,4	200,8	155,7	132,6
Lannoitusala, 1 000 ha/v ⁴⁾	57,2	96,9	96,6	96,5
Kivennäismaa	35,7	59,5	62,2	66,8
Turvemaa	21,5	37,5	34,4	29,8
Kunnostusojitusala, 1 000 ha/v ⁵⁾	25,6	22,7	22,2	18,6

²⁾ Laskentateknisistä seikoista johtuen tukki- ja kuitukertymän arviot ovat vain suuntaa antavia.

³⁾ Yläharvennus oli mahdollinen vain viimeisenä pohjapinta-alaohjeisiin perustuvana harvennuksena kiertoajan kuluessa. Lannoitusala laskennallisen lannoituskäsitteilyn mukaan. Tämän lisäksi kaikissa skenaarioissa kasvumallien kalibroituun kasvuntasoon sisältyy kalibrointijakson aikana tehtyjen kasvatuslannoitusten vaikutus (koko Suomessa runsas 23 000 hehtaaria vuodessa).

⁴⁾ Kasvuntasoon sisältyy kalibrointijakson aikana tehtyjen kasvatuslannoitusten vaikutus (koko Suomessa runsas 23 000 hehtaaria vuodessa).

⁵⁾ Kunnostusojitusalat on ilmoitettu harvennushakkuiden yhteydessä toteuttavien ojitusten osalta.

Liite F. Tärkeimpien ilmansaasteiden sektorikohtaiset päästöt KEITO-hankkeen WEM-skenaariossa

Liite lukuun 7.6.1

Taulukko F1. Tärkeimpien ilmansaasteiden sektorikohtaiset päästöt KEITO-hankkeen WEM-skenaariossa (1000 tonnia/vuosi). NOx = typen oksidit, SOx = rikin oksidit.

	Typen oksidit NOx (muodossa NO ₂)			Rikin oksidit SOx (muodossa SO ₂)		
	2022	2030	2050	2022	2030	2050
Energiantuotanto ja teollisuus	41,1	30,3	24,4	7,5	4,7	3,6
Pienpoltto	11,4	9,7	7,0	8,3	5,1	3,9
Tieliikenne	19,6	7,8	0,7	3,3	3,3	3,3
Työkoneet ja muu liikenne	16,9	12,2	8,1	3,1	1,2	0,5
Katupöly	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Muut lähteet*	8,1	8,9	8,1	0,0	0,0	0,0
Yhteensä	97,0	68,9	48,3	22,2	14,4	11,3

* Sisältää maatalouden päästöt sekä mm. rakennustyömailta ja turpeentuotannosta syntyvät pölypäästöt.

Taulukko F2. Tärkeimpien ilmansaasteiden sektorikohtaiset päästöt KEITO-hankkeen WEM-skenaariossa (1000 tonnia/vuosi). PM_{2,5} = pienhiukkaset, BC = musta hiili.

	Pienhiukkaset PM _{2,5}			Musta hiili BC		
	2022	2030	2050	2022	2030	2050
Energiantuotanto ja teollisuus	0,2	0,1	0,1	0,01	0,00	0,00
Pienpoltto	0,9	0,7	0,6	0,03	0,01	0,00
Tieliikenne	1,1	1,1	1,0	0,02	0,01	0,01
Työkoneet ja muu liikenne	8,2	5,9	2,8	2,38	1,68	0,75
Katupöly	0,4	0,2	0,0	0,21	0,07	0,00
Muut lähteet*	1,1	1,1	1,4	0,25	0,27	0,33
Yhteensä	11,9	9,2	5,9	2,9	2,0	1,1

* Sisältää maatalouden päästöt sekä mm. rakennustyömailta ja turpeentuotannosta syntyvät pölypäästöt.

Liite G. Kasvihuoneekaasujen päästöt luokittain WEM- ja WAM-skenaariossa

Taulukko G-1. Kasvihuoneekaasujen päästöt luokittain WEM- ja WAM-skenaariossa.

Gg(CO ₂ -ekv.)	WEM-skenaario									
Päästöluokka	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
1A Polttoaineiden polton päästöt	60.09	40.52	34.30	24.32	17.34	12.41	8.69	7.01	5.20	3.75
1A1 Energiateollisuus	30.94	17.75	13.08	7.09	4.94	3.57	1.89	1.77	1.56	1.12
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10.25	6.74	6.27	5.38	3.59	2.51	2.04	1.68	1.28	1.24
1A3 Kotimaan liikenne	12.71	10.85	10.44	8.56	6.49	4.60	3.33	2.30	1.23	0.36
1A4 Muut sektorit	4.98	4.21	3.79	2.72	1.90	1.50	1.26	1.14	1.06	0.96
1A5 Muu polttoainekäyttö	1.20	0.97	0.72	0.57	0.43	0.23	0.17	0.12	0.07	0.07
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	0.14	0.15	0.10	0.07	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6.09	5.64	5.03	5.20	5.11	2.87	2.11	2.10	2.09	2.16
2A Mineraaliteollisuus	1.17	0.97	0.95	0.94	0.94	0.91	1.04	1.06	1.07	1.12
2B Kemianteollisuus	1.02	1.17	1.25	1.40	1.59	0.69	0.70	0.70	0.66	0.69
2C Metalliteollisuus	2.44	2.15	1.76	2.12	2.07	0.86	0.01	0.01	0.01	0.01
2D Muu kuin energiakäyttö	0.12	0.14	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.23	0.23
2F F-kaasut	1.35	1.22	0.90	0.57	0.33	0.23	0.16	0.14	0.11	0.11
3 Maatalous	6.42	6.39	6.42	5.87	5.62	5.47	5.51	5.52	5.52	5.54
3A Kotieläinten ruoansulatus	2.35	2.37	2.33	2.03	2.03	2.07	2.11	2.13	2.14	2.15
3B Lannankäsittely	0.77	0.82	0.75	0.77	0.69	0.63	0.60	0.55	0.56	0.56
3D Maatalousmaat	3.02	3.03	3.13	2.86	2.68	2.56	2.59	2.63	2.61	2.61
3F Kasvintähteiden poltto pellolla	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3G Kalkitus	0.28	0.17	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
3H Urean levitys	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 Jätteiden käsittely	2.84	2.31	1.92	1.48	1.25	1.04	0.90	0.78	0.70	0.66
5A Jätteiden kaatopaikkasijoitus	2.43	1.94	1.55	1.11	0.89	0.68	0.55	0.44	0.37	0.37
5B Jätteiden biologinen käsittely	0.15	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.04
5D Jätevesien puhdistus	0.26	0.26	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.24	0.23	0.24
Epäsuorat CO ₂ päästöt	0.07	0.06	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Yhteensä pl. LULUCF-sektori	75.64	55.07	47.82	36.97	29.43	21.88	17.28	15.48	13.57	12.17
Gg(CO ₂ -ekv.)	WAM-skenaario									
Päästöluokka	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
1A Polttoaineiden polton päästöt	60.09	40.52	34.30	25.70	16.70	9.44	4.06	-2.96	-9.23	-10.95
1A1 Energiateollisuus	30.94	17.75	13.08	7.30	4.76	2.20	0.29	-2.38	-6.23	-7.51
1A2 Teollisuus ja rakentaminen	10.25	6.74	6.27	5.51	3.22	1.16	-0.60	-3.64	-4.88	-4.98
1A3 Kotimaan liikenne	12.71	10.85	10.44	9.59	6.70	4.61	3.18	2.02	0.99	0.42
1A4 Muut sektorit	4.98	4.21	3.79	2.73	1.63	1.25	1.04	0.94	0.87	1.12
1A5 Muu polttoainekäyttö	1.20	0.97	0.72	0.58	0.39	0.21	0.15	0.09	0.01	0.01
1B Polttoaineiden haihtumapäästöt	0.14	0.15	0.10	0.07	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04
2 Teollisuusprosessit ja tuotekäyttö	6.09	5.64	5.03	5.02	4.82	2.76	1.94	1.85	1.62	1.66
2A Mineraaliteollisuus	1.17	0.97	0.95	0.96	0.93	0.82	0.86	0.77	0.54	0.56
2B Kemianteollisuus	1.02	1.17	1.25	1.24	1.41	0.76	0.78	0.81	0.78	0.80
2C Metalliteollisuus	2.44	2.15	1.76	2.12	2.07	0.86	0.01	0.01	0.01	0.01
2D Muu kuin energiakäyttö	0.12	0.14	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.23	0.23
2F F-kaasut	1.35	1.22	0.90	0.52	0.23	0.14	0.09	0.07	0.05	0.05
3 Maatalous	6.42	6.39	6.42	5.82	5.43	5.14	5.13	5.13	5.11	5.14
3A Kotieläinten ruoansulatus	2.35	2.37	2.33	2.04	1.89	1.83	1.85	1.86	1.84	1.88
3B Lannankäsittely	0.77	0.82	0.75	0.72	0.66	0.62	0.59	0.55	0.53	0.53
3D Maatalousmaat	3.02	3.03	3.13	2.85	2.67	2.49	2.48	2.51	2.52	2.51
3F Kasvintähteiden poltto pellolla	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3G Kalkitus	0.28	0.17	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
3H Urean levitys	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 Jätteiden käsittely	2.84	2.31	1.92	1.48	1.25	1.04	0.90	0.78	0.70	0.66
5A Jätteiden kaatopaikkasijoitus	2.43	1.94	1.55	1.11	0.89	0.68	0.55	0.44	0.37	0.37
5B Jätteiden biologinen käsittely	0.15	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.04
5D Jätevesien puhdistus	0.26	0.26	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.24	0.23	0.24
Epäsuorat CO ₂ päästöt	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Yhteensä pl. LULUCF-sektori	75.64	55.07	47.82	38.15	28.31	18.47	12.10	4.87	-1.73	-3.42