

VTT Technical Research Centre of Finland

Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin

Markkanen, Johanna; Lauhkonen, Arttu

Published: 26/03/2021

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Markkanen, J., & Lauhkonen, A. (2021). *Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-00245-21



VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin

Kirjoittajat: Johanna Markkanen, Arttu Lauhkonen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Ympäristöministeriö PL 35 00023 Valtioneuvosto	Asiakkaan viite VN/1628/2021
Projektin nimi Työkoneiden päästöjen perusennuste	Projektin numero/lyhytnimi TYKOPERUS 129648
Tiivistelmä <p>Työkoneiden päästöt ja niiden vähentäminen ovat nousseet kiinnostuksen kohteiksi Suomen ilmasto- ja energiapolitiikassa. Työkoneiden laajamittainen sähköistyminen on vasta alkutekijöissä, mutta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistarve ajaa osaltaan työkoneiden sähköisten voimalinjojen kehitystä sekä siirtymistä biopolttoaineisiin. Työkoneiden päästölaskenta on toteutettu aiemmin pääasiassa tarkastelemalla fossiilisilla polttoaineilla toimivia työkoneita. Tämän työn tavoitteena oli luoda uusi perusennuste työkoneiden päästöille vuoteen 2040, joka ottaa huomioon sekä sähkökäyttöiset työkoneet että biopolttoöljyn lisääntyvän käytön. Perusennusteen taustatiedoksi toteutettiin analyysi työkoneiden sähköistymisen kehityksestä rajoittaen tarkastelu suuripäästöisimpiin työkoneiluokkiin. Työssä arviointiin myös mahdollisuuksia toteuttaa eri politiikkatoimenpiteiden vaikutusarviointeja työkoneiden päästölaskentamallilla, mutta mallin rajoitteet sallivat vain erillistarkastelut biopolttoöljyn jakeluvaihteen korottamisen sekä työkoneiden nopean sähköistymisen päästövähennyspotentiaaleille.</p> <p>Työkoneiden sähköistyminen on pidemmällä pienitehoisissa ja -kokoisissa työkoneissa. Suurikokoisten, latausinfraan ulottumattomissa käytettävien työkoneiden sähköistäminen on haastavaa niin akkujen energiasisällön riittävyyden kuin koneen tarvitseman tehon kannalta. Perusennusteessa sähköistymisen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin alkaa näkyä vasta 2030-luvulla. Nopean sähköistymisen skenaariossa kasvihuonekaasupäästöt vähenevät voimakkaasti vuodesta 2026 lähtien saavuttaen enintään -46 %:n lisäpäästövähennyksen vuoteen 2040 mennessä verrattuna perusennusteeseen. Biojakeluvaihteen muutoksilla saavutetaan enintään -26 %:n lisäpäästövähennys vuoteen 2040 mennessä. Sähkötyökoneiden kehitykseen vaikuttaminen esimerkiksi CO₂-raja-arvoilla voi nopeuttaa markkinatarjonnan runsastumista ja täten vähentää painetta korottaa biojakeluvaihtetta riittävien päästövähennysten toteuttamiseksi.</p>	
Espossa 26.3.2021 Laatija Johanna Markkanen tutkija	Tarkastaja Juhani Laurikko johtava tutkija
VTT:n yhteystiedot Johanna Markkanen, johanna.markkanen@vtt.fi	
Luottamuksellisuus Julkinen	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaaja, VTT	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Sisällysluettelo

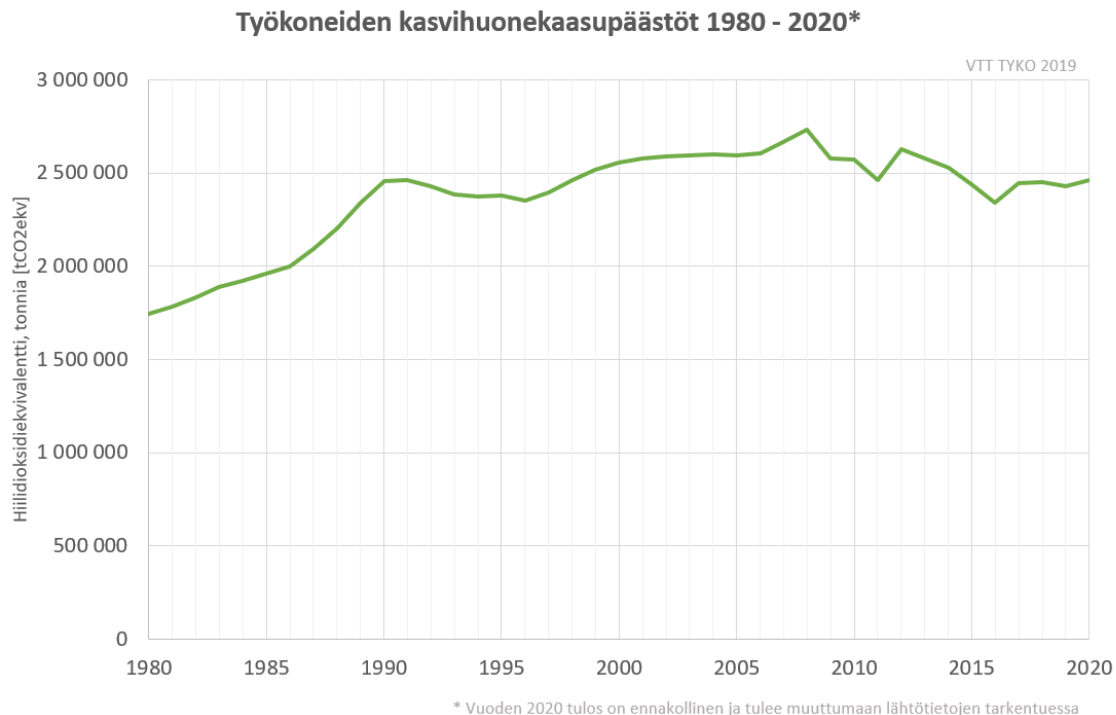
1. Johdanto.....	3
1.1 Työkoneiden päästöt.....	4
1.2 Keskeinen työkonepäästöihin vaikuttava sääntely	5
2. Työn toteutus	7
2.1 Menetelmäkuvaus.....	7
2.2 Aikataulu ja projektin eteneminen	9
3. Työkoneiden vaihtoehtoiset käyttövoimat ja perusennuste.....	9
3.1 Analyysi sähkö- ja kaasukäyttöisten työkoneiden yleistymisestä.....	9
3.1.1 Markkinatarjonta ja sen kehitys lähitulevaisuudessa	10
3.2 Työkoneiden perusennuste vuoteen 2040	13
3.3 Skenaariotarkastelut ja toimenpiteiden vaikutusarviot	16
3.3.1 Jakeluvuorituksen erillistarkastelu	17
3.3.2 Nopean sähköistymisen skenaario.....	19
4. Johtopäätökset ja yhteenveto.....	20
5. Lähdeviitteet	22

1. Johdanto

Työkoneiden päästöt (kasvihuonekaasu- sekä lähipäästöt) ja niiden vähentäminen ovat nousseet kiinnostuksen kohteiksi Suomen ilmasto- ja energiapolitiikassa. VTT:n kehittämällä ja ylläpitämällä TYKO-mallilla lasketaan koko Suomen polttomoottorikäyttöisten työkoneiden ja maastoajoneuvojen vuosittaiset viralliset päästöinventaarit. TYKO-malli on kuitenkin vanhentunut nykytarpeisiin nähden eikä mallia ole uudistettu koko sen yli 20-vuotisen olemassaolon aikana.

VTT tuotti suunnitelman TYKO-mallin uudistamiseksi vuonna 2019 (Laurikko & Mäkelä 2019). Raportissa on kattavasti kuvattu TYKO-mallin vaatimat pitkän aikavälin kehitystarpeet mallin ajantasaisuuden takaamiseksi. Malli tuottaa myös aikasarjan tulevaisuuteen 2040-luvulle asti, mutta mallia ei ole koskaan varsinaisesti suunniteltu ennustamaan päästökehitystä. Työkoneiden päästölaskenta on aiemmin toteutettu pääasiassa tarkastelemalla fossiilisilla polttoaineilla toimivia työkoneita. Työkoneiden vaihtoehtoisten käyttövoimien yleistymisen asettaa haasteita työkoneiden nykyiselle päästöjen sekä energiankäytön laskennalle. Vaihtoehtoisten käyttövoimien ja etenkin sähköisten työkoneiden yleistymisen on kuitenkin alkutekijöissään, ja muutoksen suuruutta sekä nopeutta ei ole aiemmin arvioitu.

Työkoneiden tulevaisuuden päästöennusteissa on tarve ottaa huomioon vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivat työkoneet, kuten sähköisellä voimalinjalla varustetut ja kaasukäyttöiset työkoneet. Tämän projektin tavoitteena oli analysoida työkoneiden sähköistymisen ja ”kaasuistumisen” vaikutusta päästöihin hyödyntäen alan kirjallisuutta, työkonevalmistajien sekä työkonevalmistajien tuoreimpia tietoja sähköistymisen etenemisestä. Analyysin avulla tuotettiin uudet, päivitettyt perusennusteet työkoneiden päästökehitykselle vuoteen 2040 asti hyödyntäen TYKO-mallia.



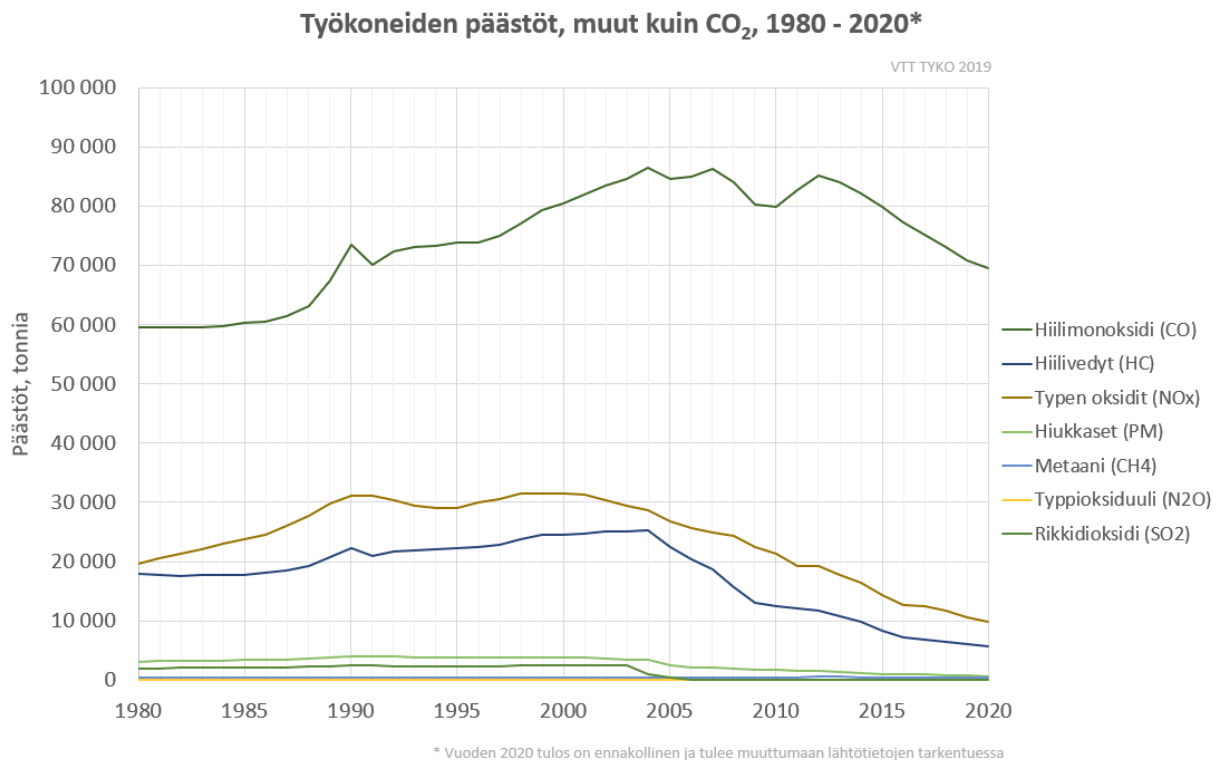
Kuva 1. Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt vuosina 1980 – 2020.

Yhä kasvava kiinnostus khk-päästövähennystoimenpiteisiin ja niiden vaikutusten arviointeihin haastaa myös nykyisen työkoneiden energiankäytön- ja päästöjen mallinnuksen: TYKO-mallia käyttäen toimenpiteiden tarkastelua ei ole aiemmin tehty. Tämän projektin toisena tavoitteena

oli selvittää mitä TYKO-mallilta vaaditaan, jotta toimenpiteiden tarkastelu Suomen työkonekantaan on mahdollista. Vaatimusten pohjalta määriteltiin mitä mallin uudistustöitä voidaan toteuttaa lyhyellä aikavälillä skenaariotarkastelujen mahdollistamiseksi.

1.1 Työkoneiden päästöt

Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt ovat pysyneet likimain samalla tasolla viimeisen 30 vuoden ajan TYKO 2019 -mallin tulosten mukaan (Kuva 1). Mallinuksissa päästöt ovat vaihdelleet vain hieman alle 2.5 miljoonan CO₂ekv-tonnin ja yli 2.5 miljoonan CO₂ekv-tonnin välillä. Muita määrällisesti merkittäviä työkoneiden polttoaineen poltosta aiheutuvia suoria päästöjä ovat hiilimonoksidi, typen oksidit ja hiilivedyt (Kuva 2). Hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt ovat kasvaneet saavuttaen huippunsa vuonna 2004. Kaikki lähipäästöt ovat kuitenkin vähentyneet viimeisten 15 vuoden aikana työkoneiden Stage-päästösääntelyn vuoksi.



Kuva 2. Työkoneiden päästöt, muut kuin CO₂, vuosina 1980 – 2020.

Valtaosa moottoroiduista työkoneista käyttää fossiilisia polttoaineita käyttövoimanaan, mutta vaihtoehtoiset käyttövoimat kuten sähkö ja kaasu alkavat olla varteenotettavia vaihtoehtoja tietyissä työkonekategorioissa. TYKO-malli sellaisenaan laskee vain fossiililla polttoaineilla toimivien työkoneiden päästöt. Dieselyökoneiden oletetaan käyttävän fossiilista moottoripolttoöljyä eli kevyttä polttoöljyä, bensiinityökoneiden oletetaan käyttävän liikennekäyttöön myytävää bensiiniseosta ja kaasukäyttöisten maakaasua; ainoa malliin sisällytetty kaasukäyttöinen työkone on haarukkatrukki.

Työkoneiden khk-päästöistä 80% on peräisin vain kymmenestä eri työkoneeryhmästä. Kun tähän lisätään vielä yhdeksän seuraavaksi suuripäästöistä työkoneeryhmää, saadaan 90% kaikista khk-päästöistä. Täten vaihtoehtoisten käyttövoimien ja etenkin sähköistymisen

yleistymisen kannalta on mielekästä tarkastella vain Taulukossa 1 lueteltuja suuripäästöisimpiä työkoneryhmiä, sillä niillä on suurin vaikutus kokonaisuuteen.

Suuripäästöisimpien työkoneryhmien joukossa valtaosa on dieselkäyttöisiä. Maataloustraktorit, pyöräkuormaajat ja tela-alustaiset kaivukoneet tuottavat jo lähes puolet kaikista khk-päästöistä. Moni suuripäästöinen työkoneryhmä on joko maatalous-, metsä- tai maanrakennuskone, mutta joukossa on myös puutarhakoneisiin kuuluvat ajettavat- ja työnnettävät ruohonleikkurit. Maastoajoneuvoista 2-tahtiset moottorikelkat ovat myös listalla; mikäli kaikki moottorikelkat summattaisiin yhdeksi ryhmäksi, ne kuuluvat myös suuripäästöisimpien työkoneneiden joukkoon.

Taulukko 1. Suuripäästöisimmät työkoneryhmät (VTT TYKO 2019)

#	Käyttövoima	Työkoneryhmä	tCO ₂ ekv	%
1	diesel	Maataloustraktorit	390 326	16 %
2	diesel	Pyöräkuormaajat	385 994	32 %
3	diesel	Kaivukoneet, tela-alustaiset	367 712	47 %
4	diesel	Hakkuukoneet (Moto)	216 006	56 %
5	diesel	Haarukkatrukit, diesel	173 047	63 %
6	diesel	Dieselgeneraattorit	111 288	68 %
7	diesel	Metsätraktorit	106 599	72 %
8	diesel	Kaivukoneet, pyöräalustaiset	83 540	76 %
9	diesel	Leikkuupuimurit	51 350	78 %
10	diesel	Muut traktorit	42 923	79 %
11	bensiini	Ajoruohonleikkurit, bensiini	41 487	81 %
12	bensiini	Moottorikelkat 2-tahti, muu käyttö	33 140	82 %
13	diesel	Muut ajettavat dieselyökoneet	32 043	84 %
14	diesel	Kompressorit	29 617	85 %
15	diesel	Teleskooppikurottajat	29 347	86 %
16	bensiini	Ruohonleikkurit, bensiini	27 056	87 %
17	diesel	Monitoimikoneet	25 953	88 %
18	diesel	Tiehöylät	24 760	89 %
19	diesel	Traktorikaivurit	23 847	90 %

Tämän projektin tarkastelut rajattiin koskemaan Taulukossa 1 esitettyjä työkoneryhmiä niiden suuren merkityksensä vuoksi.

1.2 Keskeinen työkonepäästöihin vaikuttava sääntely

Työkoneiden päästöihin vaikuttava lainsäädäntö painottuu kotimaan ja EU:n tasolla moottorien pakokaasujen terveydelle haitallisten lähipäästöjen sekä polttoaineiden laadun ja koostumuksen sääntelyyn. Suurin osa työkoneluokista on hiilidioksidipäästösäätelyn ulkopuolella (Nylund, Söderena & Rahkola 2016). Lähipäästöjen määriin on pyritty vaikuttamaan työkonemoottorien Stage -luokituksella. Stage -sääntely alkoi vuonna 1997 voimaan tulleella direktiivillä (97/68/EY) ja sen jälkeen Stage-luokkia on asteittain kiristetty ja sääntelyn pariin on lisätty koneluokkia. Viimeisimmät vaatimukset ovat tulleet EU-asetuksen No: 2016/1628 myötä (Motiva 2020).

Stage -säännelyihin päästöihin kuuluvat hiilimonoksidi eli häkä, typenoksidit, pienhiukkaset ja hiilivedyt sekä myös ammoniakkipäästöt sääntelyn vaiheissa III ja IV. Hiilidioksidipäästöjä ei ole Stage -lainsäädännössä rajoitettu, mutta Stage IV -luokasta alkaen moottorivalmistaja on velvollinen ilmoittamaan päästö määrään (Nylund, Söderena & Rahkola 2016; Motiva 2020).

Uusiutuvan energian käytön edistämiseen pyrkivä uusiutuvan energian direktiivi RED II (EU 2018/2001) tuli voimaan 24.12.2018. Direktiivin mukaan uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta tulee olla vähintään 32 % vuoteen 2030 mennessä. RED II on saatettava osaksi kansallista lainsäädäntöä viimeistään 30.6.2021 ja se korvaa alkuperäisen uusiutuvan energian direktiivin RED I (2009/28/EY). RED II:n toimeenpano on tällä hetkellä meneillään ja direktiivin vaatimusten johdosta mm. jakeluelvoitelaki ja kestävyyslaki tullaan uudistamaan (TEM 2021; Koponen & Sokka 2019).

BIOSEKOITEVELVOITE

Bio-osuuden määrää polttoaineissa sääntelee biovelvoitelainsäädäntö. Lainsäädännön perustana on polttoaineiden laatudirektiivi (Fuel Quality Directive, FQD) 2009/30/EY sekä uusiutuvan energian käytön direktiivi RED I ja jatkossa RED II. (Sipilä 2018; St1 2021)

Työkoneisiin myytävän biopolttoöljyn määrää säädellään lailla biopolttoöljyn käytön edistamisestä (2019/418). Lain tarkoituksena on edistää biopolttoöljyn käyttöä kevyen polttoöljyn korvaamiseksi lämmityksessä, työkoneissa ja kiinteästi asennetuissa moottoreissa. Lain polttoainejakelussa biopolttoöljyn energiasisällön osuus kulutukseen toimitettavan kevyen polttoöljyn ja biopolttoöljyn energiasisällön kokonaismäärästä (jakeluelvoite) tulee olla vähintään 3,0 prosenttia vuonna 2021 ja seuraavina vuosina aina yhden prosenttiyksikön edellisvuotta suurempi vuoteen 2028 asti, josta alkaen osuuden tulee olla vähintään 10,0 prosenttia¹. On huomionarvoista, että jakeluelvoite ulottuu myös lämmitykseen. Vaikutukset päästöihin ovat tätä kautta huomattavasti laajemmat.

POLTTOAINEIDEN LAATUSÄÄNTELY

Eri vuodenaikojen polttoainelaatujen ominaisuuseroilla havaittiin olevan vaikutusta polttoaineenkulutukseen vuonna 2004 julkaistussa tutkimuksessa (Murtonen), jossa testattiin erilaisten diesel-polttoaineiden eroja raskaassa linja-automootorissa. Tarkasteltaessa yksikössä litraa/tunti, tuloksiin vaikutti osittain polttoaineiden tiheyserot; tiheämmällä polttoaineella saadaan moottorista suurempi teho, jos polttoaineen lämpöarvo ei muutu. Kulutuserot aiheutuivat myös muista tekijöistä, kuten polttoaineen viskositeetistä ja lämpöarvosta. (emt.) Tulokset eivät ole suoraan sovellettavissa työkonemoottoreihin tai niissä käytettäviin polttoaineisiin, koska pelkästään työympäristö ja työskentelytavat vaikuttavat suuresti polttoaineenkulutukseen. Tutkimus kuitenkin vahvistaa käsitystä siitä, että polttoaineiden keskimääräisiin ominaisuuksiin vaikuttavalla laatusäätelyllä on osavaikutus työkoneiden polttoainekulutukseen ja edelleen työkoneiden aiheuttamiin päästöihin.

Polttoaineiden laatua sääntelevät muun muassa direktiivit 98/70/EY, joka astui voimaan vuonna 2000, 2003/17/EY, joka astui voimaan vuonna 2005 sekä vuonna 2011 voimaan tullut laatudirektiivi (FQD) 2009/30/EY. Lainsäädännön lisäksi pakokaasupäästövaatimusten myötä on muodostunut öljyalaa koskevia laatuvaatimuksia eli standardeja. Standardeja on laadittu öljynjalostuksen ja laitevalmistajien yhteistyönä. Standardit² ovat suosituksia, joiden käyttöä viranomaiset voivat vaatia. On huomioitava, että kansalliset lait ovat standardien yläpuolella ja

¹ Laki biopolttoöljyn käytön edistamisestä (2019/418).

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2019/20190418>

² Diesel: EN 590:2013; Bensiini: EN 228:2012; Etanoli: EN 15376:2014; Korkeaseosetanoli E85: CEN/TS 15293:2011; Polttoöljy: Kansallinen SFS 5968:2009; Biokomponentit FAME: EN 14214:2014; HVOCEN/TS: 15940:2012 (tulossa EN 15940).

markkinalähtöiset ja paikallisten olosuhteiden tuomat vaatimukset polttoaineille ylittävät yleensä standardien vähimmäistason. (St1 2021)

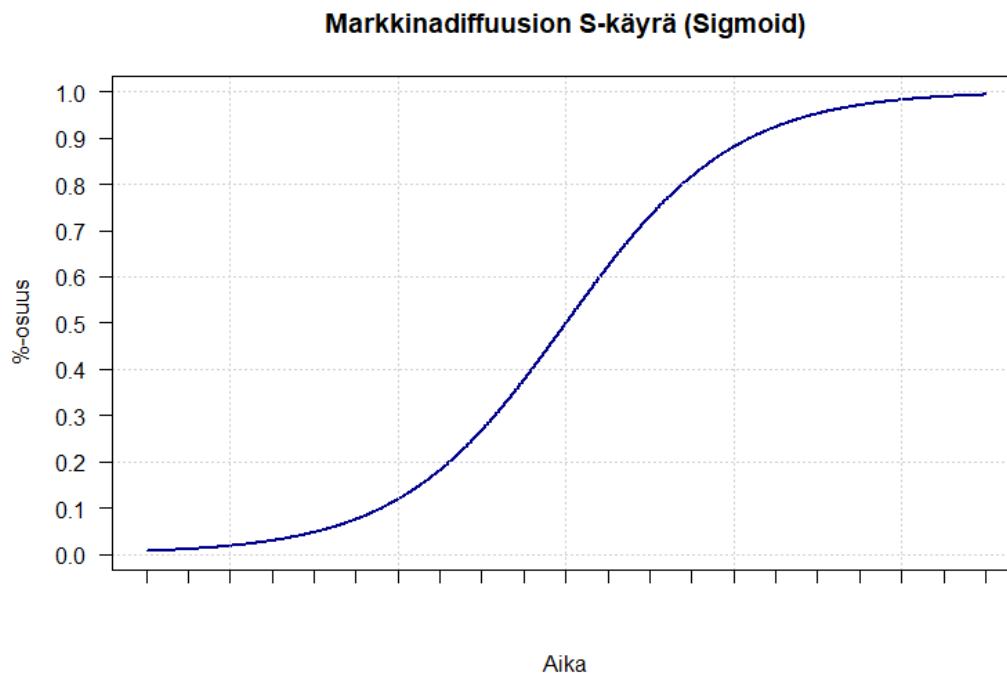
2. Työn toteutus

2.1 Menetelmäkuvaus

Vaihtoehtoisten käyttövoimien yleistymistä analysointiin vain merkittävimpien, suuripäästöisten työkoneryhmien osalta (Taulukko 1). Vaihtoehtoisista käyttövoimista merkittävimpinä pidettiin tällä hetkellä sähköä ja kaasua.

Tämänhetkistä markkinatilannetta tutkittiin Teknisen Kaupan Liiton myyntitilastoilla, joista puutarhakoneille oli saatavissa käyttövoimakohtainen jaottelu. Lisäksi hyödynnettiin maanrakennuskoneiden myyntitilastoa, jossa samanlaista käyttövoimakohtaista jaottelua ei ollut sähkökoneiden vähäisten myyntimäärien vuoksi. Teknisen Kaupan Liitto teetti alkuvuonna 2021 kyselyn työkonemyyjille myytyjen maanrakennuskoneiden käyttövoimista: kyselyn tuloksia hyödynnettiin sähköisten maanrakennuskoneiden sekä maastoajoneuvojen markkinadiffuusion arvioinnissa. Markkinadiffuusiota ja työkonkehityksen tilaa arvioitiin myös hyödyntäen työkonvalmistajien tietoja, uutisartikkeleita sekä alan tieteellistä kirjallisuutta. Osa jo TYKO-malliin sisällytetyistä lähtötiedoista myyntien osalta sisältää tiedon käyttövoimasta; tietoa hyödynnettiin myös analyysissä.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella kaasukäyttöisten työkoneneiden markkinadiffuusio muissa työkoneneissa kuin trukeissa ei ole edennyt osin edes tuotekehitysvaiheeseen. Tästä syystä työssä tehtiin rajausta jättää kaasukäyttöisten työkoneneiden tarkastelu pois, sillä teknologinen kehitys ei niiden osalta ole vielä kypsä.



Kuva 3. Markkinadiffuusio

Uusien käyttövoimien onnistunutta markkinadiffuusiota kuvaa S-käyrä (Kuva 3), jossa muutos on alussa eksponentiaalisesti kiihtyvää, saavuttaa huippunsa puolivälissä, ja on tämän jälkeen

eksponentiaalisesti hidastuvaa. Tämä kuvastaa uusien innovaatioiden käyttöönoton epävarmuuksia ja riskejä (Orr 2003). Sähkökäyttöisten työkonien myyntimäärien muutoksen oletettiin seuraavan S-käyrää. Työssä oletettiin myös, että sähkökäyttöiset työkonet tulevat korvaamaan polttomoottorikäyttöiset työkonet pitkällä aikavälillä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Aiemmin TYKO-mallin myyntimäärät ovat olleet vakioita seuraten nykytason kehitystä; myyntimäärien muuttuessa myös tulevaisuuden ennustettua myyntimäärää on korjattu.

TYKO-malli ei sisällä sähkökäyttöisten työkonien kantaa, joten sähkökäyttöisten työkonien vaikutusta päästöihin oli mahdollista toteuttaa aikataulun puitteissa vain vähentämällä oletettua polttomoottorikäyttöisten työkonien myyntimäärää.

$$Uusi\ myynti\ \left(\frac{kpl}{v}\right) = Vanha\ myynti\ \left(\frac{kpl}{v}\right) \times (1 - p)$$

Työkonien myyntimäärien muuttamiseksi kullekin tarkasteltavalle työkoneryhmälle määriteltiin markkinadiffuusion tämänhetkinen tila, eli kuinka suuri osa työkoneryhmän kokonaisyntymisestä on sähkökäyttöisiä (p). Sen lisäksi määriteltiin muutoksen nopeus eli kuinka paljon sähkökäyttöisten myynti on kasvanut edellisvuodesta niille työkonille, joille tarkkaa tilastotietoa oli saatavilla. Näitä työkonita olivat ajoruhonleikkurit, ruohonleikkurit ja trimmerit. Trimmerit eivät kuulu suuripäästöisimpien työkonien listalle, mutta uuden myyntidatan perusteella trimmerien myyntiennuste oli merkittävän epätarkka ja virhe korjattiin uuden datan myötä.

Muille työkoneryhmille ei ollut numeerista tietoa muutosnopeudesta. Sähkökäyttöisten työkonien markkinadiffuusioista ja muutosnopeudesta on kirjallisuudessa hyvin vähän arvioita: Lajunen (2018) arvioi, että vuonna 2035 puolet uusista työkonista on varustettu sähköisellä voimalinjalla, tarkoittaen molempia ladattavia hybridejä sekä täysin sähköisiä työkonita. TYKO-mallissa ei kuitenkaan voida huomioida hybridikoneita lainkaan; mikäli arvioissa olettaisimme puolet uusista työkonista täysin sähköisiksi, olisi sähköistymisen vaikutus mitä todennäköisimmin yliarvioitu. Jotta otimme huomioon TYKO-mallin puutteet hybridikoneiden mallintamiseen, siirsimme aiemmin mainittua arviota siten, että vuonna 2040 puolet uusista työkonista on täyssähköisiä. Tätä arviota käyttäen analysoitiin muutosnopeus ja uudet myyntimäärät maanrakennuskoneista kaivukoneille, pyöräkuormaajille, traktorikaivurille ja teleskooppikurottajille sekä maastoajoneuvoista mönkijöille ja ammattikäyttöön myytävälle moottorikelkoille. Haarukka- ja muille trukeille sähköistymisen muutosnopeus arvioitiin rekisteritiedon ja työkonemyyjien tiedon perusteella. Maa- ja metsätaloustalokoneiden oletetaan sähköistyvän hitaimmin (Lajunen et al. 2018), joten sähkökonien ei oleteta saavan markkinaosuutta myynnissä ennen 2035. Maa- ja metsätaloustalokoneista leikkuupuimureiden, maataloustraktoreiden, hakkuukoneiden, metsätraktoreiden ja muiden traktoreiden sähköistyminen asetettiin alkamaan vuodesta 2035 siten, että puolet näiden työkonien myyntimääristä on täyssähköisiä vuonna 2050.

Työkonepäästöjen uutta, päivitettyä perusennustetta varten TYKO 2019-malliin päivitettiin biopolttoöljyn jakeluvaihe³ täysimääräisenä dieselikäyttöisille työkonille.

Projektin vaihe 3 piti sisällään arvion TYKO-mallin soveltuvuudesta eri toimenpiteiden ja päästövähennyskeinojen vaikutusarvioihin. Seuraavien päästövähennyskeinojen tarkastelun mahdollisuutta arviointiin:

- biopolttoöljyn jakeluvaiheen muutos
- biokaasun käyttö työkonissa

³ Laki biopolttoöljyn käytön edistämisestä (418/2019)

- polttoaineiden veronkorotusten ja investointitukien tarkastelut
- muutokset työkoneiden energiatehokkuudessa
- muutokset työkoneiden työsuoritteissa
- sähkö- ja vetykäyttöisten työkoneiden yleistyminen

Kunkin osalta arviointiin, onko tarkastelu sellaisenaan mahdollista nykyisessä TYKO-mallissa, mitä mahdollisia muutoksia TYKO-malli vaatii ja kuinka suuri muutosten toteuttamiseen vaadittu työmäärä on. Arviot koostettiin taulukkoon raportin osaan 3.3.

2.2 Aikataulu ja projektin eteneminen

Projekti aloitettiin helmikuun alusta. Työkoneiden sähköistymisen analyysi sekä perusennuste (vaiheet 1 ja 2) tehtiin samanaikaisesti helmikuussa siten, että perusennuste valmistui 26.2.2021. Perusennusteen kooste esitettiin yhteiskokouksessa tilaajalle 2.3.2021, jolloin keskusteltiin myös WAM-skenaarioiden ja toimenpidearviointien tarpeista sekä toiveista. Keskustelu toimi pohjana projektin vaiheelle 3, jossa määritettiin muutostarpeen työkoneiden energiankulutuksen- ja päästöjen mallinnukseen toimenpidearviointien toteuttamiseksi. Viimeisenä laskettiin erillistarkasteluna biojaketulvoitteen korottamisen sekä nopean sähköistymisen päästövähennyspotentiaalit.

3. Työkoneiden vaihtoehtoiset käyttövoimat ja perusennuste

3.1 Analyysi sähkö- ja kaasukäyttöisten työkoneiden yleistymisestä

Työkoneiden vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat suurelta osin vasta joko saapumassa markkinoille tai kehitysvaiheessa. Sähkö- ja kaasukäyttöiset työkoneet asettavat uusia haasteita työkone teknologian kehitykselle; riittävän energiamäärän varastointi vaatii kookkaita akkuja tai kaasutankkeja, jotka vievät enemmän tilaa kuin polttomoottoritekniikka työkoneessa.

Kehitys on nopeinta pienten työkoneiden osalta, joissa koneen tyypillisen käytön tarvitsema energiamäärä voidaan varastoida vaatimatta liiallisia muutoksia työkoneen suunnitteluun. Myös työkoneen tyypillinen toimintaympäristö vaikuttaa kehitykseen. Toisessa ääripäässä on työkoneet, joita operoidaan sisätiloissa tai rajatulla ulkoalueilla. Nämä työkoneet on helpompi sähköistää, sillä tiheä latausmahdollisuus sallii pienemmän akun käytön. Toisessa ääripäässä on taasen metsätyökoneet, jotka voivat operoida maastossa päiviä erillisen dieselsäiliön voimin palaamatta infran ääreen ennen työn loppuunsaattamista. (Lajunen et al. 2018)

Työkoneiden kirjo on valtavaa ja yhä useammin työkone on suunniteltu spesifisesti tiettyyn työtehtävään (Lajunen et al. 2018). Tehontarve on sähköistymisen kannalta haastavaa: kunkin työkoneen sähköinen voimalinja tulee suunnitella juuri kyseisen työtehtävän tyypillisiin käyttöjaksoihin sopivaksi, jotta moottori kykenee tarjoamaan riittävästi tehoa (Moreda, Muñoz-García & Barreiro 2016). Täten spesifisen sähköisen voimalinjan rakentamiseen vaadittua tekniikkaa ei voida yleistää kaikkiin työkoneisiin sopivaksi vaan tekniikka joudutaan suunnittelemaan uniikiksi jokaista työkone tyyppiä varten (Lajunen et al. 2018).

Tällä on taasen vaikutus hintakehitykseen: uuden teknologian kehityksessä massatuotanto saa aikaan hintojen laskun, mutta spesifiin työtehtäviin tarkoitettujen työkoneiden myyntimäärät eivät maailmanlaajuisestikaan ole suuria. On mahdollista, että hintakehitys jää maltilliseksi monien spesifisten sähkökäyttöisten työkoneiden osalta. (Lajunen et al. 2018).

3.1.1 Markkinatarjonta ja sen kehitys lähitulevaisuudessa

Tarkasteltavien työkoneryhmien vaihtoehtoisten käyttövoimien markkinatarjonnan analyysi jaettiin kahteen osaan: runsaan ja kapean markkinatarjonnan työkoneluihin. Kaasukäyttöisten työkonoiden markkinatarjontaa sekä kehitystä on tarkasteltu samanaikaisesti, vaikkakin tarkastelun pääpaino on sähkökäyttöisissä työkoneluissa.

Runsas markkinatarjonta

Tarkastelluista työkoneryhmistä muutama täyssähkökäyttöinen ja yksi kaasukäyttöinen on onnistuneesti tuotu markkinoille ja tarjoaa runsaan valikoiman eri kokoluokissa (Kuva 4).

Haarukkatrukkeja, ajoruohtonleikkureita, kompressoreita ja työnnettäviä ruohonleikkureita on saatavana markkinoilla runsaasti täyssähköisinä versioina. Haarukkatrukeissa myös kaasu on realistinen vaihtoehto, sillä esimerkiksi Toyota Forklifts:lla on suurempi valikoima kaasukäyttöisiä trukkeja kuin dieselkäyttöisiä⁴. Työkonemyyjien mukaan Suomessa tällä hetkellä myytävistä haarukkatrukeista kuitenkin keskimäärin 79% on sähkökäyttöisiä ja loput dieselkäyttöisiä. Otos oli kuitenkin pieni, eikä välttämättä täten edusta täysin koko Suomen haarukkatrukkimyyntiä. Rekisteritietojen perusteella (TYKO-mallin lähtötieto, luottamuksellinen) valtaosa rekisteröidyistä, haarukkatrukeista on dieselkäyttöisiä; näin ollen on myös selvää, että suurinta osaa trukeista ei rekisteröidä lainkaan. Data antaa viitteitä sille, että tieliikenteessä ajettavilla haarukkatrukeilla pääasiallinen käyttövoima on yhä diesel, eikä sähkökäyttöiset ole korvanneet vielä toistaiseksi niitä; ajotarpeen määrä ja latausmahdollisuudet tulevat vaikuttamaan siihen, kuinka nopeasti dieselkäyttöiset haarukkatrukit korvautuvat sähkökäyttöisillä.



Kuva 4. Runsas markkinatarjonta eri kokoluokissa sähkö- ja/tai kaasukäyttöisille työkoneluille talvella 2020 tehdyn katsauksen mukaan.

Ruohonleikkureissa sähkö on jo kilpailukykyinen vaihtoehto polttomoottorikäyttöisten ajo- ja työnnettävien ruohonleikkurien rinnalla. Sähkökäyttöisten työnnettävien ruohonleikkureiden osuus myynnistä oli 28 % vuonna 2019 ja nousi 36 %:iin vuonna 2020. Ruohonleikkureiden myyntivolyymit ovat suuria ja uusi käyttövoimakohtainen data antoi aihetta korjata TYKO-mallin edellistä oletamaa polttomoottorikäyttöisten ruohonleikkureiden myynnistä, joka oli oletettu liian suureksi. Ajoruohtonleikkureissa valtaosa on yhä polttomoottorikäyttöisiä. Ruohonleikkureiden markkinoille saapuneet akkukäyttöiset robottiruohonleikkurit yleistyvät vauhdilla ja kilpailevat muiden ruohonleikkureiden rinnalla markkinaosuudesta; niiden myyntimäärät olivat jo liki samaa luokkaa ajoruohtonleikkureiden kanssa vuonna 2020. Myös

⁴ Toyota Forklifts: Polttomoottorikäyttöiset vastapainotrukit. <https://toyota-forklifts.fi/tuotteemme/polttomoottorikaeyttoiset-vastapainotrukit/?page=1&sortStrategy=0>

muut puutarhatyökoneet sähköistyvät nopeasti; uusista pensasleikkureista 96 % on sähkökäyttöisiä, silppureista 99 %, kannettavista puhaltimista 70 %, vesipumpuista 96 % ja sahoista 34 % vuonna 2020; em. muut puutarhatyökoneet kuin ruohonleikkurit eivät sisällyneet suuripäästöisimpien työkoneiden joukkoon eikä niitä täten otettu huomioon laskennassa. Merkittävää on se, että sähkökäyttöisten suhteellinen osuus myynnistä on kasvanut vuodesta 2019 vuoteen 2020 jokaisessa edellä mainituissa tilastoidussa työkoneryhmässä.

Kompressoreissa sähkö on yleisesti saatavilla oleva käyttövoima, mutta niiden myyntivolyymi TYKO-mallissa on pientä, eikä myynnin jakautumisesta polttomoottori- ja sähkökäyttöisiin ole tarkempaa tietoa saatavilla.

Kapea markkinatarjonta tai ei markkinatarjontaa lainkaan

Suurella osalla paljon päästävistä työkoneryhmistä on kapea tai rajoitettu markkinatarjonta tai ei markkinatarjontaa lainkaan, kun tarkastellaan vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivia työkoneita (Kuva 5).

Harvesterien ja leikkuupuimurien myyntimäärät ovat joitakin satoja vuodessa, mutta mallitarjonta vaihtoehtoisissa käyttövoimissa on rajoittunutta. Harvesterien (hakkuukoneiden) osalta markkinoilla on yksi hybridimalli valmistajalta Logset⁵. Täyssähköisten ja kaasukäyttöisten harvestereiden kehityksestä ei ole tietoa tarjolla. Leikkuupuimureista löytyy yksi kaasukäyttöinen malli⁶, mutta sähkökäyttöisten kehityksestä ei ole tietoa.

Traktoreista maataloustraktorit, metsätraktorit ja muut traktorit tarkasteltiin yhtenä traktoriluokkana tiedon vähyyden takia. John Deere kehittää sähköistä traktorimallistoaan ja on esitellyt prototyypin täyssähköisestä traktorista⁷, mutta tuotantoa ja myyntiä ei vielä ole. Fendt on myös kehittänyt yhden täyssähköisen mallin⁸, joka ei ole toistaiseksi tuotannossa. TYKO-mallin lähtödatan tarkastelu osoitti kuitenkin, että traktorirekisterissä on muutamia sähkökäyttöisiä maataloustraktoreita, joiden huomioiminen tarkastelussa vaatisi enemmän tietoa niiden alkuperästä. New Holland on esitellyt prototyypinsä kaasutraktorista⁹, jonka arvioidaan päätyvän myyntiin noin 2021 tiheän kaasuverkon maihin Italiaan ja Saksaan. Myös Valtralla on ollut jo pidempään kehitteillä metaani-diesel-hybriditraktorit¹⁰. Kuitenkin valtaosa vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivista traktoreista on vasta konsepti- ja tuotekehitysvaiheessa.

⁵ Logset 12H GTE Hybrid. <https://www.logset.com/fi/harvesterit/logset-12h-gte-hybrid>

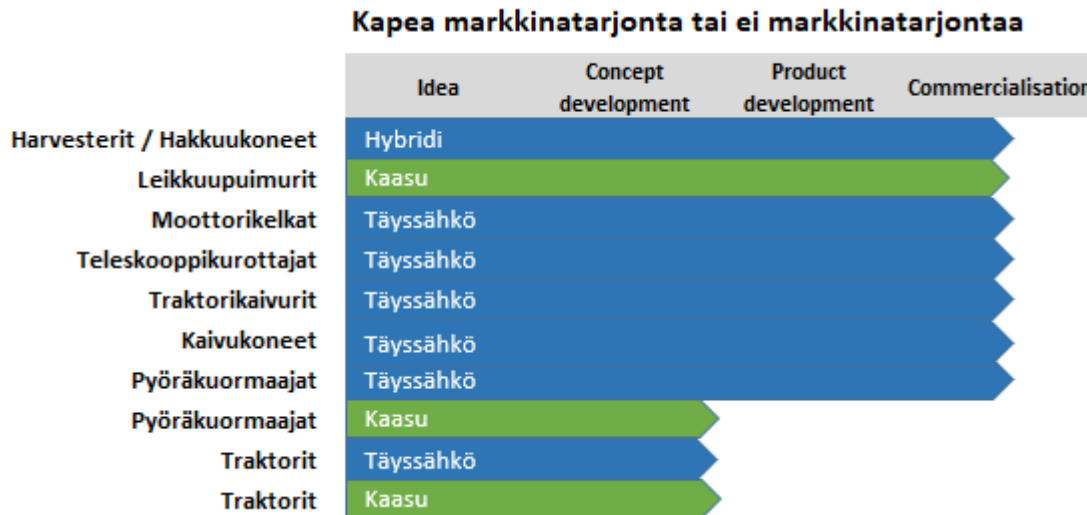
⁶ Bioenergy International: Gomselmash trial world's first CNG-powered combine harvester. <https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/gomselmash-trial-worlds-first-cng-powered-combine-harvester>

⁷ Maaseudun tulevaisuus: John Deere esitteli täyskokokoisen sähkötraktorin. <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/koneet-autot/john-deere-esitteli-t%C3%A4yskokokoisen-s%C3%A4hk%C3%B6traktorin-katso-video-1.172310>

⁸ Fendt e100 Varjo: The battery-powered compact tractor. <https://www.fendt.com/int/fendt-e100-vario>

⁹ Maaseudun tulevaisuus: Biokaasu käyttöön: New Hollandin ensimmäiset metaanitruktorit markkinoille kahden tai kolmen vuoden kuluessa <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/maatalous/artikkeli-1.224815>

¹⁰ Kivirock: Valtra esitteli kuusisylinterisen SCR-moottorilla varustetun biokaasutraktorin. <https://www.kivirock.fi/uutiset.html?270>



Kuva 5. Kapea markkinatarjonta tai ei markkinatarjontaa lainkaan sähkö- ja/tai kaasukäyttöisille työkoneille talvella 2020 tehdyn katsauksen mukaan.

Suuret maa- ja metsätalouskoneet ovat yhä käytännössä polttomoottorillisia, mutta niiden osalta automaatio voi edistää sähköistämistä; automatisaatio on mahdollista toistuvissa ja ennakoitavissa työtehtävissä (Lajunen et al. 2018). Sähköistymistarkastelussa otettiin huomioon se, että suuritehoiset koneet ovat erittäin todennäköisesti viimeisimpiä työkoneita, joiden sähköversiot saapuvat markkinoille, mutta olettaen, että automatisaatio ajaa kehitystä. Täyssähköisten myynnin arvioitiin alkavan perusskenaariossa täten vasta 2035. Hybridejä myydään mahdollisesti jo aiemminkin, mutta hybridikoneita ei voida huomioida nykyisessä TYKO-mallissa.

Rakennuskäyttöön tarkoitetuista teleskooppikurottajista löytyy täyssähköisiä kurottajia pienessä kokoluokassa. Kaasukäyttöisten kehityksestä ei ole tietoa. Kurottajien vuosittaiset myyntivolyymit ovat pieniä ja mallitarjonta kapeaa. TYKO-malli huomioi vain rakennuskäyttöön tarkoitetut teleskooppikurottajat, ei esimerkiksi satama-alueilla käytettäviä suuritehoisia konttikurottajia. Mikäli satama-alueiden suuritehoiset konttikurottajat otettaisiin mukaan laskentaa, se nostaisi kokonaisuutena. Konttikurottajia on jo saatavana täyssähköisinä ja hybridiversioina; esimerkiksi Kalmar valmistaa vähemmän polttoainetta kuluttavia ”ekokurottajia”¹¹. Satamakurottajien sähköistymiskehityksen myötä voidaan olettaa, että myös rakennuskäyttöön tarkoitettavat suuritehoisemmat kurottajat kyetään teknologisesti sähköistämään lähitulevaisuudessa.

Traktorikaivureissa sähköistyminen on vasta alkanut, kun esimerkiksi valmistaja Case on julkistanut ensimmäisen täyssähköisen traktorikaivurimallinsa¹² vuonna 2020. Traktorikaivurien vuosittainen myynti on todella pientä Suomessa, eikä tuoreen työkonemyyjille suunnatun kyselyn perusteella täyssähköisiä traktorikaivureita vielä myydä.

Pyöräkuormaajista täyssähköisiä versioita on saatavilla ainakin pienessä ja keski-kokoluokissa. Mallivalikoima on kuitenkin suppeaa ja valmistajilla on merkittävästi suurempi määrä vastaavia polttomoottoripyöräkuormaajia myytävänä. Valmistajista esimerkiksi Avant ei itsekään suosittele täyssähköisiä mallejaan ensisijaiseksi työkoneeksi missään työkategoriassa¹³. Kaasukäyttöiset pyöräkuormaajat ovat konseptikehitysvaiheessa; Case

¹¹ Kalmar: Kurottajat. <https://www.kalmar.fi/laitteet-palvelut/konttikurottajat/>

¹² Case Construction: The industry's first fully electric backhoe loader - The Case 580 EV. <https://www.casece.com/northamerica/en-us/products/backhoe-loaders/580ev-project-zeus>

¹³ Avant kuormaajat. <https://www.avantteco.com/fi/kuormaajat>

esitteli metaanikäyttöisen pyöräkuormaajan¹⁴ konseptin Baumassa vuonna 2019. Valtaosa myytävistä pyöräkuormaajista TYKO-mallissa on suuremman kokoluokan koneita, kuin mitä markkinoilla tällä hetkellä olevat täyssähköiset versiot voisivat korvata. Työkonemyyjien mukaan sähkökäyttöisiä pyöräkuormaajia myyntiosuus Suomessa on hieman alle yksi prosentti. Pienten pyöräkuormaajien sähköistymisellä on pieni vaikutus laskennan lopputulokseen, mutta odotettavissa on myös suuremman kokoluokan pyöräkuormaajien sähköistyminen, jolla tulee olemaan suurempi vaikutus.

Kaivinkoneissa täyssähköisten markkinatarjonnan tarkastelu ei tuonut esille julkisesti myynnissä olevia sähkökaivinkoneita; Cat on esitellyt prototyypin suuren kokoluokan sähköisestä tela-alustaisesta kaivinkoneesta¹⁵. Suomen työkonemyyjien tilastojen mukaan kuitenkin täyssähkökäyttöisiä kaivinkoneita myydään keskimäärin 0,5 % ja hybridejä noin 5 % kokonaisymyynnistä. Kaasukäyttöisiä kaivinkoneita ei julkisen tiedon mukaan ole millään kehitysasteella. Kaivinkoneiden myyntivolyymit ovat muutamia satoja vuosittain ja tämänhetkisen tiedon valossa sähköistyminen on alkanut.

Tiehöyliä vaihtoehtoisista käyttövoimista ei ollut tietoa saatavilla. Tiehöyliä tehon- ja energiantarve on korkea ja voidaan olettaa, että akkuteknologian tulee kehittyä energiatiheämmäksi ennen kuin tiehöyliä sähköistämisen on teknologisesti ja ekonomisesti kannattavaa. Tiedon puutteen vuoksi tiehöyliä oletetaan olevan tulevaisuudessakin polttomootorilla toimivia.

Maastoajoneuvoista moottorikelkat ovat suuripäästöisimpien työkonien joukossa. Sinänsä moottorikelkka ei ole työkonie, mutta niiden päästölaskenta on integroitu työkonien päästölaskentaan. Markkinatarkastelun mukaan moottorikelkkojen sähköistyminen on vasta alkanut. Sähköisiä moottorikelkkoja valmistaa kaupallisesti Suomessa Aurora Powertrains, jonka tuotannon määrä on toistaiseksi rajallinen ja kelkkoja myydään vain ammattikäyttöön¹⁶. Moottorikelkkojen vuosittaiset myyntivolyymit ammattikäyttöön ovat tuhannen kelkan luokkaa; mikäli pieni osa näistä kelkoista myytäisiin sähköisiä, olisi vaikutus työkonien kokonaispäästöihin hyvin pieni. Työkonemyyjien mukaan kuitenkin sähköisiä moottorikelkkoja ei ole myyty heidän kauttaan, vaikka suppeaa markkinatarjontaa on. Näin ollen voidaan olettaa, että sähkömoottorikelkkojen mallitarjonta laajenee lähitulevaisuudessa, mutta sähköistyminen kohdistuu ensin voimakkaammin ammattikäyttöön myytäviin kelkkoihin. Todennäköisesti vuoteen 2040 mennessä markkinoilla on jo yksityiskäyttöön tarkoitettuja täyssähköisiä moottorikelkkoja. Mönkijät eivät kuuluneet suuripäästöisimpien työkonien joukkoon, mutta työkonemyyjien mukaan noin 1,5 % myydyistä uusista mönkijöistä on täyssähköisiä.

Näiden edellä mainittujen työkoneryhmien jälkeen jäljelle suuripäästöisten listalla jäävät muut ajettavat dieselyökonieet ja monitoimikoneet, joiden sähköistymisen vaikutuksen tarkastelu on haastavaa TYKO-mallissa työkoneryhmien laajuuden vuoksi

3.2 Työkonien perusennuste vuoteen 2040

Uusi perusennuste työkonien päästöjen kehitykselle aikavälillä 2020 – 2040 on laskusuuntainen kaikille päästölajeille.

¹⁴ Case Construction: World's first methane powered construction vehicle at Bauma 2019. <https://www.casece.com/emea/en-eu/resources/news/2019/case-unveils-the-worlds-first-methane-powered-vehicle-at-bauma>

¹⁵ Caterpillar unveils an all-electric 26-ton excavator with a giant 300 kWh battery pack. <https://electrek.co/2019/01/29/caterpillar-electric-excavator-giant-battery-pack/>

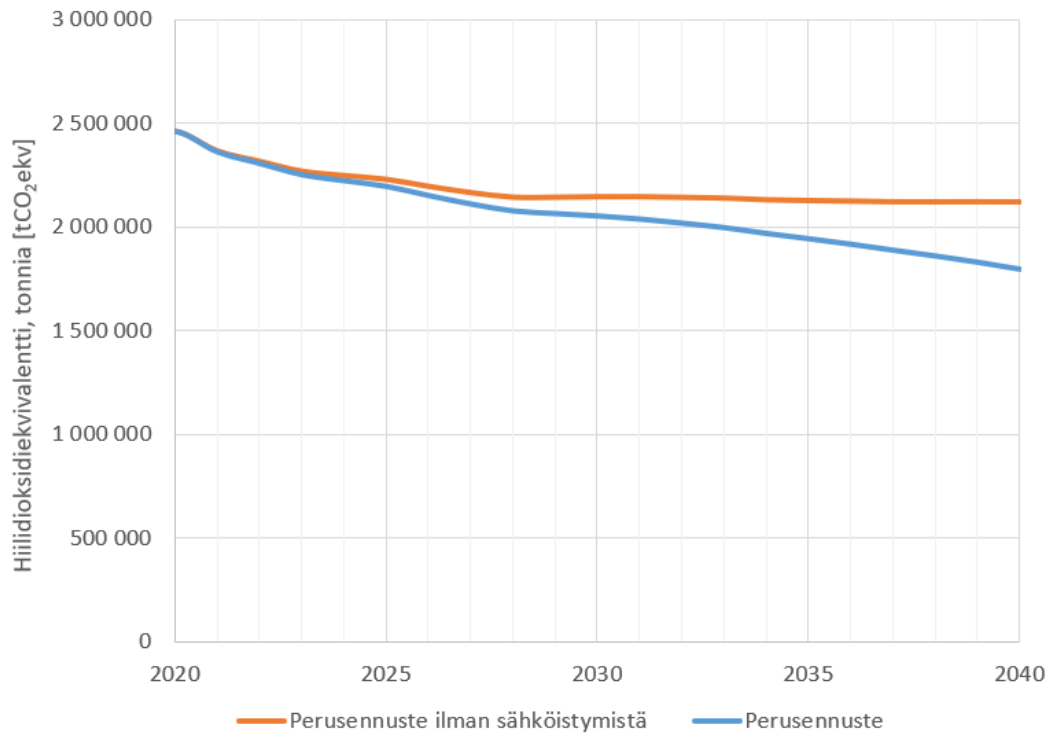
¹⁶ Koneviesti: Suomalainen startup-yritys Aurora Powertrains aloittaa sähköisten moottorikelkkojen toimitukset norjalaiselle Hurtigruten Svalbardille. <https://www.koneviesti.fi/uutiset/artikkeli-1.524952>

Ennen sähkökäyttöisten työkonien huomioimista TYKO-mallin laskennassa työkonien khk-päästöt vähenevät vuoteen 2028 asti biopolttoöljyn jakeluvaihteen vuoksi. Tämän jälkeen ennusteissa khk-päästöjen väheneminen pysähtyy, sillä jakeluvaihteen oletettiin pysyvän vakiotasollaan 10 %:ssa aina vuoteen 2040 asti.

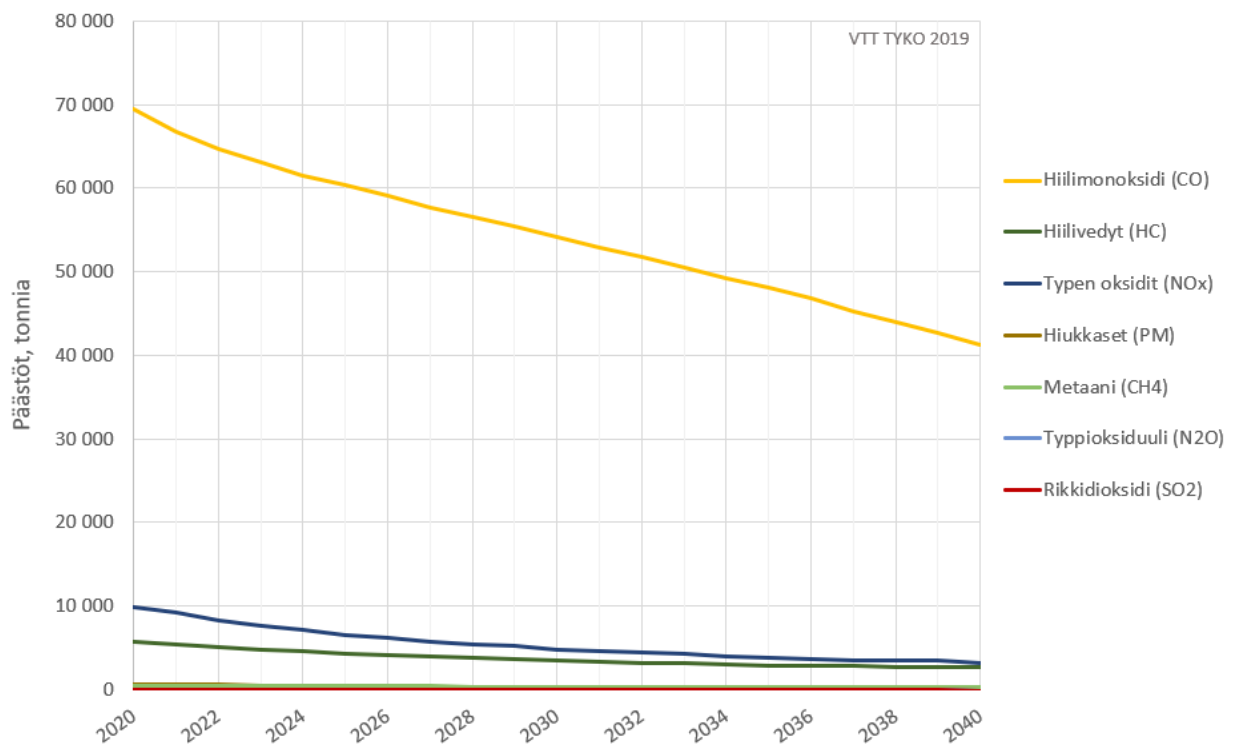
Sähkötyökonien sisällyttäminen TYKO-malliin vaikutti selvästi perusennusteen päästökehitykseen. Uusi perusennuste sisältää maltillisen sähköistymisen vaikutuksen työkonipäästöihin; perusennuste kuvaa tämänhetkisen tiedon mukaisesti (kts. kappale 3.1 *Analyysi sähkö- ja kaasukäyttöisten työkonien yleistymisestä*) sähkötyökonien markkinadiffuusion minimitaso vaikutusta polttomoottorikonien myyntimäärien vähenemiseen. Tästä lähtien perusennusteella viitataan nimenomaan uuteen perusennusteeseen, joka sisältää oletuksen sähkötyökonien yleistymisestä.

Perusennusteissa khk-päästöt vähenevät -26 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna nykytilaan eli vuoden 2020 tasoon (Kuva 6). Sähkötyökonien hidas markkinadiffuusio 2020-luvulla ei vaikuta päästöihin vielä merkittävästi. Vasta 2030-luvulla teknologisen kehityksen oletetaan olevan kypsempää vauhdittamaan markkinadiffuusiota.

Polttomoottorityökonien väheneminen edesauttaa myös terveydelle haitallisten ilmapäästöjen vähentämisessä (Kuva 7). Kaikissa päästöissä kehitys on laskusuuntaista: hiilimonoksidi- eli häkäpäästöissä eniten ja hiukkaspäästöissä vähiten.

Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt 2020 - 2040


Kuva 6. Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt perusennusteessa vuosina 2020 – 2040.

Työkoneiden päästöt, muut kuin CO₂, perusennuste 2020 - 2040


Kuva 7. Työkoneiden muut päästöt perusennusteessa vuosina 2020 – 2040.

3.3 Skenaariotarkastelut ja toimenpiteiden vaikutusarviot

TYKO-mallin soveltuvuutta toimenpiteiden vaikutusten arviointiin ja tulevaisuusskenaarioiden luomiseksi on tarkasteltu tutkimalla mahdollisten toimenpiteiden muuttamista nykyisessä mallirakenteessa (Taulukko 2). Mikäli toimenpiteen tarkastelu sellaisenaan ei ole nähty mahdollisena, taulukossa on listattu vaaditut muutokset mallin rakenteeseen ja toimintaan tarkastelun mahdollistamiseksi.

Taulukko 2. Toimenpiteiden tarkastelu TYKO-mallissa.

Mahdollinen toimenpide	Tarkastelu mahdollista	Vaaditut muutokset TYKO-malliin	Työmäärä
Biopolttoöljyn jakeluvaihteen muutos	kyllä*	*Tarkastelu on hidasta. Useampien jakeluvaihteen tasojen tarkasteluun TYKO-malli tulee siirtää toiseen ohjelmointiympäristöön, jossa tarkasteluja voidaan automatisoida.	suuri
Biokaasun käyttö työkoneissa	ei**	Kaasukäyttöisten ja kaasumuunnettujen työkoneiden lisääminen malliin. **Nykyisellään TYKO-malli sisältää vain kaasukäyttöiset haarukkatrukit.	keskisuuri
Polttoaineiden veronkorotusten ja investointitukien tarkastelut	ei	TYKO-mallia tulisi laajentaa sisältämään polttoaineiden hinta- ja verotiedot, työkoneiden investointikustannukset sekä kustannusten vaikutukset työkoneiden kantaan ja käyttöön. Vaatii laajan taustatutkimuksen parametrien säätämiseksi.	suuri
Muutokset työkoneiden energiatehokkuudessa	ei	Säätömuuttujan lisääminen, jolla energiatehokkuutta voidaan muuttaa halutussa työkoneeryhmässä. Vaatii muutoksia mallirakenteeseen.	keskisuuri
Muutokset työkoneiden työsuoritteissa	ei	Käyttöliittymä käyttötuntien muuttamiseksi eri työkoneeryhmiin.	keskisuuri
Sähkö- ja vetykäyttöisten työkoneiden yleistäminen	kyllä***	***Yleistymistä voi kuvata vain vaikutuksella polttomoottorikoneiden myyntiin. Sähkö-, hybridi- ja vetykäyttöisten työkoneet tulisi lisätä malliin omina kategorioinaan, jotta niiden kannan muutoksia voi seurata.	keskisuuri

Tarkastelu osoitti, että TYKO-mallilla suoritettavat toimenpiteiden päästö- ja kustannusvaikutusten tarkastelut vaatisivat laajoja muutoksia mallirakenteeseen. Toimenpiteestä riippuen TYKO-mallin rakennetta ja laskentamenetelmiä tulisi muuttaa Taulukko 2:ssä kuvatuilla tavoilla. Kaasu-, sähkö- ja vetykäyttöisten työkoneiden lisääminen on yksinkertaisin toteutettavissa oleva työ, joka sekin on työmäärältään keskisuuria. Käytännössä Excel-pohjaiseen TYKO-malliin ei ole suositeltavaa tehdä yksittäisiä rakenteellisia muutoksia, sillä mallirakenne on vanha ja tulisi nykyaikaistaa siirtämällä pois Excel-ympäristöstä muuhun toimintavarmempaan ohjelmointiympäristöön. Siirto tekisi kompleksisen mallin hallinnasta on nopeampaa, vähentäisi virheherkkyyttä ja loisi mahdollisuuden vaikuttaa mallin kaikkiin muuttujiin.

TYKO-mallin heikkous toimenpiteiden vaikutusten arvioinneissa on etenkin se, että malli on hajautettu kolmeen eri osamalliin. Malleissa kunkin työkonealuokan energiankulutuksen- ja päästöjen laskenta on omalla välilehdellään. Kunkin mallin kaikki välilehdet tulee ajaa erikseen, ja kunkin työkoneen tietojen muuttaminen täytyy suorittaa manuaalisesti jokaisessa eri osamallissa, jokaisella eri välilehdellä. Laskutoimenpiteet suoritetaan ketjutettuna makroissa, joita on kymmenittäin. Näistä syistä TYKO-malli nykyisessä muodossaan ei sovellu skenaarioiden luontiin ja toimenpiteiden päästövaikutusten arviointiin ilman mallirakenteen täydellistä uudistusta. Kustannusvaikutusten arviointiin nykyisellä TYKO-mallilla ei ole

edellytyksiä, sillä malli laskee energiankäyttöä sekä päästöjä, eikä sisällä kustannusparametrejä.

3.3.1 Jakeluvaihteen erillistarkastelu

Tilaaajan pyynnöstä laadittiin kolme eri skenaariota biopolttoaineen jakeluvaihteen korotuksen päästövähennyspotentiaalille koskien työkoneiden khk-päästöjä. TYKO-mallia ei käytetty sellaisenaan tarkastelussa (kts. perustelu Taulukko 2), mutta tarkastelun pohjana käytettiin TYKO-mallilla laskettua polttoaineen sekä urealiuoksen kulutusta.

Vertailutasona käytettiin perusennustetta, jossa sähköistymispotentiaali on otettu minimissään huomioon (nk. uusi perusennuste). Työssä tarkasteltiin kolmea eri tasoa jakeluvaihteelle:

BIO20: Korotus 20 %:iin vuonna 2035

- Korotus vuodesta 2031 alkaen +2 %/v

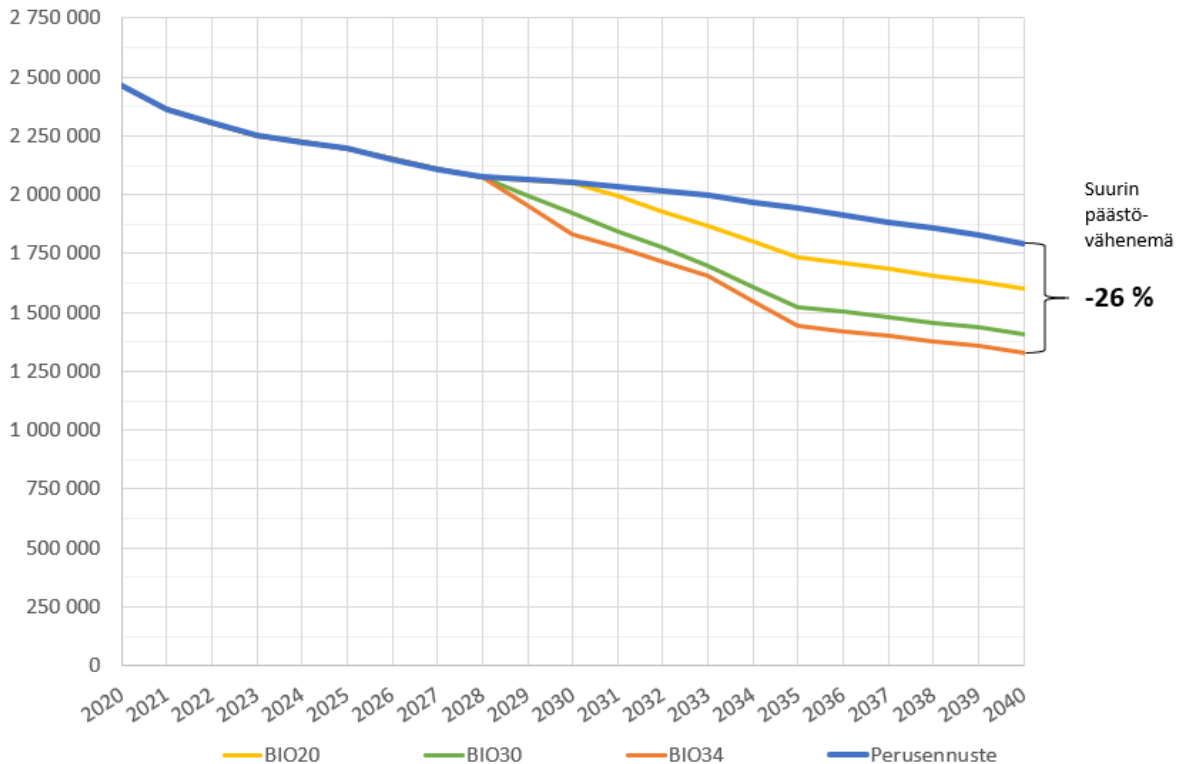
BIO30: Korotus 30 %:iin vuonna 2035

- Korotus vuodesta 2029 alkaen +3 %/v

BIO34: Korotus 20 %:iin vuonna 2030 ja 34 %:iin vuonna 2035

- Korotukset jaettiin mahdollisimman tasaisesti välttäen suuria kertaisäyksiä, jolloin jakeluvaihteen uudet tasot BIO34-skenaariossa olivat seuraavat:
 - 2029: 15 %
 - 2030: 20 %
 - 2031: 22 %
 - 2032: 24 %
 - 2033: 26 %
 - 2034: 30 %
 - 2035 ja eteenpäin: 34 %

Biopolttoaineen jakeluelvoitteen korotuksen vaikutus työkoneiden khk-päästöihin



Kuva 6. Jakeluelvoitteen korotusten vaikutus khk-päästöihin kolmessa eri skenaariossa.

Biojakeluelvoitteen korottaminen vähentää työkoneiden suoria fossiilisia khk-päästöjä kaikissa skenaarioissa. Päästövähennykset realisoituvat aikaisintaan vuodesta 2029 skenaarioissa BIO30 ja BIO34 ja vuodesta 2031 skenaariossa BIO20. Biojakeluelvoitteen korottamisen lisäpäästövähennyspotentialiaali on enintään -26 % vuonna 2040 verrattuna perusennusteeseen (Kuva 6).

Perusennusteessa khk-päästöt vähenevät -26 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna nykytilaan eli vuoden 2020 tasoon (2,46 milj. t CO₂ekv). Biopolttoöljyn jakeluelvoitteen korottaminen vauhdittaa khk-päästövähennyksiä siten, että BIO20-skenaariossa vähennys on -35 %, BIO30-skenaariossa -42 % ja BIO34-skenaariossa -45 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna vuoden 2020 tasoon.

Verrattaessa työkoneiden khk-päästöjen vuoden 2005 tasoon (2,59 milj. t CO₂ekv), päästövähennys BIO20-skenaariossa on -33 %, BIO30-skenaariossa -41 % ja BIO34-skenaariossa -44 %.

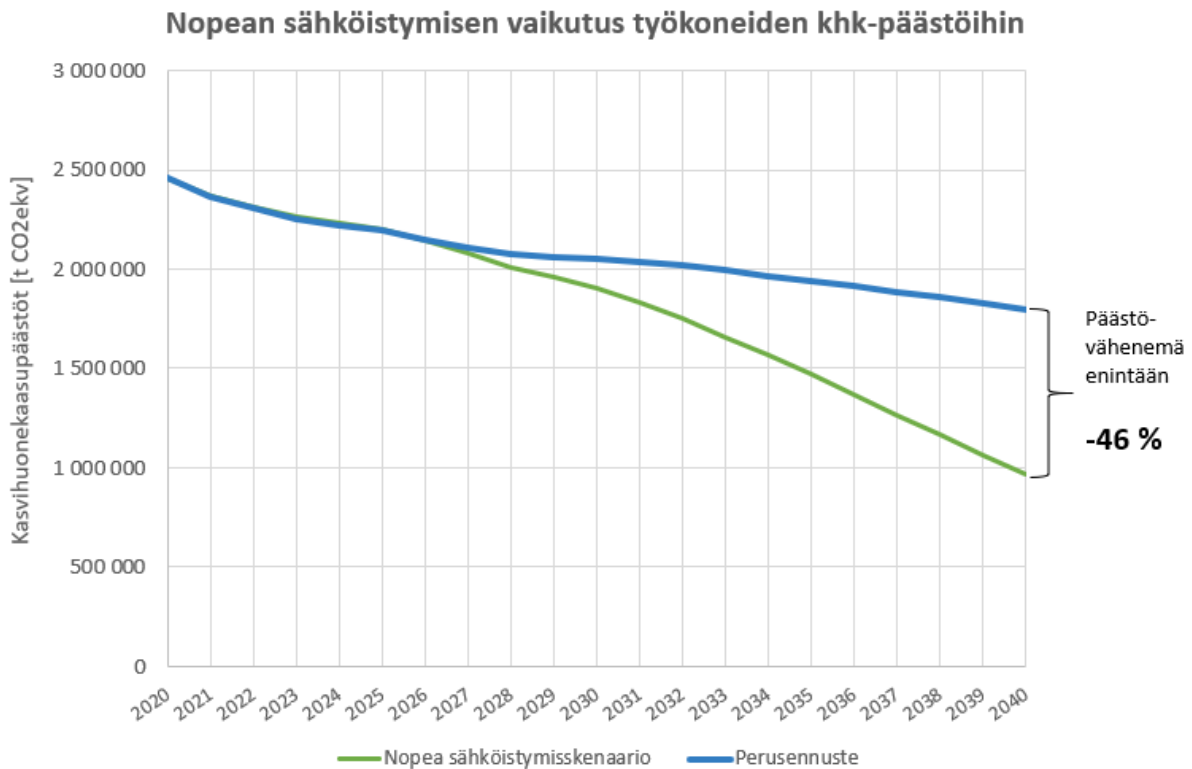
Taulukko 3. Khk-päästöt ja lisäpäästövähennykset jakeluelvoitteen korotusskenaarioissa verrattuna perusennusteeseen.

Skenaario	BIO20		BIO30		BIO34	
	[tCO ₂ ekv]	Lisäpäästövähennys	[tCO ₂ ekv]	Lisäpäästövähennys	[tCO ₂ ekv]	Lisäpäästövähennys
Vuosi						
2019	2 429 312	0 %	2 429 312	0 %	2 429 312	0 %
2020	2 463 393	0 %	2 463 393	0 %	2 463 393	0 %
2021	2 363 044	0 %	2 363 044	0 %	2 363 044	0 %

2022	2 307 380	0 %	2 307 380	0 %	2 307 380	0 %
2023	2 252 563	0 %	2 252 563	0 %	2 252 563	0 %
2024	2 223 431	0 %	2 223 431	0 %	2 223 431	0 %
2025	2 195 741	0 %	2 195 741	0 %	2 195 741	0 %
2026	2 151 153	0 %	2 151 153	0 %	2 151 153	0 %
2027	2 110 129	0 %	2 110 129	0 %	2 110 129	0 %
2028	2 076 571	0 %	2 076 571	0 %	2 076 571	0 %
2029	2 063 611	0 %	1 997 578	-3 %	1 953 556	-5 %
2030	2 052 132	0 %	1 920 628	-6 %	1 832 958	-11 %
2031	1 993 490	-2 %	1 841 005	-10 %	1 775 654	-13 %
2032	1 930 809	-4 %	1 779 649	-12 %	1 714 867	-15 %
2033	1 867 040	-6 %	1 696 033	-15 %	1 653 281	-17 %
2034	1 798 286	-9 %	1 608 586	-18 %	1 545 353	-21 %
2035	1 733 072	-11 %	1 524 948	-21 %	1 441 699	-26 %
2036	1 709 311	-11 %	1 503 925	-21 %	1 421 771	-26 %
2037	1 683 315	-11 %	1 480 961	-21 %	1 400 019	-26 %
2038	1 658 100	-11 %	1 458 691	-21 %	1 378 927	-26 %
2039	1 630 989	-11 %	1 434 763	-21 %	1 356 272	-26 %
2040	1 600 695	-11 %	1 408 059	-21 %	1 331 004	-26 %

3.3.2 Nopean sähköistymisen skenaario

Tilaaajan pyynnöstä laadittiin nopean sähköistymisen skenaario, jossa sähköistyminen (teknologinen kehitys sekä markkinadiffuusio) tapahtuu nopeammin kuin perusennusteessa. Skenaariossa on arvioitu sähköistymisen potentiaalia työkoneryhmittäin huomioimalla työkoneiden sähkön käytön teknistä vaatavuutta yhdistettynä latausmahdollisuuksiin, akun lisämäärän tuoma haittaa työkoneen käytölle sekä sähkötyökoneen houkuttelevuutta investointikustannusten ja polttoainekustannusten näkökulmasta. Markkinadiffuusion muutosnopeus on arvioitu sen perusteella, kuinka vaativaa työkonetyypin sähköistäminen em. kriteerien perusteella.



Kuva 7. Nopean sähköistymisen khk-päästövähennyspotentiaali.

Khk-päästöt seuraavat perusennusteen uraa nopeassa sähköistymisskenaariossa vuoteen 2026 asti, jonka jälkeen sähköistymisen päästövähennyspotentiaali kasvaa nopeasti. Nopean sähköistymisen skenaariossa työkoneiden khk-päästöt laskevat siten, että vuonna 2030 päästöt ovat 1,90 milj. t CO₂ekv, vuonna 2035 1,47 milj. t CO₂ekv ja vuonna 2040 0,96 milj. t CO₂ekv.

Lisäpäästövähennys verrattuna perusennusteeseen on vuoteen 2030 mennessä -7 %, vuoteen 2035 mennessä -24 % ja vuoteen 2040 mennessä -46 %. Verrattaessa työkoneiden khk-päästöjen vuoden 2005 tasoon (2,59 milj. t CO₂ekv), päästövähennys nopean sähköistymisen skenaariossa on -43 %.

Nopean sähköistymisen päästövähennyspotentiaali on suuri verrattuna perusskenaarioon. Eroa selittää oletus sähköisten työkoneiden vauhdikkaammasta markkinadiffuusiosta, joka on perusennusteessa huomattavasti konservatiivisempi. Nopean sähköistymisen skenaario esittää sähköistymisen maksimipäästövähennyspotentiaalia nykytiedon valossa.

4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Työkoneiden päästöt ja niiden vähentäminen ovat nousseet kiinnostuksen kohteiksi Suomen ilmasto- ja energiapolitiikassa. Työkoneiden khk-päästöt ovat pysyneet likimain samalla tasolla viimeisen 30 vuoden ajan TYKO 2019 -mallin tulosten mukaan. Lähipäästöt ovat kuitenkin vähentyneet viimeisten 15 vuoden aikana Stage-päästösäätelyn vuoksi.

Valtaosa suuripäästöisimmistä työkoneista on dieselkäyttöisiä: maataloustraktorit, pyöräkuormaajat ja tela-alustaiset kaivukoneet tuottavat jo lähes puolet kaikista khk-päästöistä. Vaihtoehtoiset käyttövoimat kuten sähkö ja kaasu alkavat olla varteenotettavia vaihtoehtoja pienikokoisissa ja -tehoisissa työkoneissa, mutta suurikokoisten, latausinfra-

ulottumattomissa käytettävien työkoneiden sähköistäminen on haastavaa niin akkujen energiasisällön riittävyyden kuin koneen tarvitseman tehon kannalta.

Akkusähköisten työkoneiden markkinatarjonta monen suuripäästöisimmän työkonealuokan osalta on suppeaa tai sitä ei ole vielä lainkaan. Sähkötyökoneiden hidas markkinadiffuusio 2020-luvulla ei vaikuta päästöihin perusennusteessa vielä merkittävästi. Vasta 2030-luvulla teknologisen kehityksen oletetaan olevan kypsempää vauhdittamaan markkinadiffuusiota. Sähköistymisellä on kuitenkin merkittävä päästövähennyspotentialiaali: nopeampi teknologinen kehitys ja markkinadiffuusio voivat vähentää päästöjä lähes puoleen vuoteen 2040 mennessä perusennusteeseen verrattuna.

Työkoneiden laajamittainen sähköistyminen on vasta alkutekijöissään, mutta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistarve ajaa osaltaan työkoneiden sähköisten voimainjoiden kehitystä sekä siirtymistä biopolttoaineisiin. Pitkällä aikavälillä myös automaation uskotaan osaltaan vauhdittavan työkoneiden sähköistymistä. Työkoneiden lähipäästöjä sääntelevä Stage-luokitus on saanut päästöt onnistuneesti laskuun, mutta hiilidioksidi- ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen sääntely puuttuu täysin. CO₂-raja-arvo voisi vauhdittaa sähkötyökoneiden teknologista kehitystä ja markkinadiffuusioita vähentäen painetta biopolttoaineiden käytön lisäämiseen khk-päästöjen vähentämiseksi.

5. Lähdeviitteet

Lajunen, A., Sainio, P., Laurila, L., Pippuri-Mäkeläinen, J., Tammi, K. (2018). Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery, *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–22.

Laurikko, J., Mäkelä, K. (2019). TYKO-mallin tiedonkeruujärjestelmän kehittäminen. Tutkimusraportti VTT-R-00432-19. *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*

Koponen, K., Sokka, L. (2019). REDII -direktiivi: Kasvihuonekaasupäästövähennemää koskevat kestävyyskriteerit: (päivitys raporttiin VTT-R-04453-17). Tutkimusraportti Nro VTT-R-00887-19. *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*.

Motiva (2020). Kestävät julkiset hankinnat. Työkoneet. Motivan verkkosivut (viitattu 17.3.2021). Saatavissa: https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/tyokoneet

Nylund, N.O., Söderena, P., Rahkola, P. (2016). Työkoneiden CO₂ päästöt ja niihin vaikuttaminen. Tutkimusraportti VTT-R-04745-16. *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*

Moreda, G.P., Muñoz-García, M.A., Barreiro, P. (2016). High voltage electrification of tractor and agricultural machinery - A review. *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, no. x, pp. 117–131, 2016

Murtonen, T. (2004). Polttoaineen laadun vaikutus polttoaineen kulutukseen raskaassa dieselmoottorissa. VTT Processes. Project Report, no. PRO3/5115/04, *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*. Saatavilla: <https://cris.vtt.fi/en/publications/polttoaineen-laadun-vaikutus-polttoaineen-kulutukseen-raskaassa-d>

Orr, G. (2003). Diffusion of innovations, by Everett Rogers (1995). Retrieved January, 21, 2005.

Sipilä, E., Kiuru, H., Jokinen, J., Saarela, J., Tamminen, S., Laukkanen, M., Palonen, P., Nylund, N.O., Sipilä, K. (2018). Biopolttoaineiden kustannustehokkaat toteutuspolut vuoteen 2030. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta. *Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 63/2018*. Lokakuu 2018.

St1. (2021). Velvoitteet ja standardit. Verkkosivusto (viitattu 18.3.2021). Saatavissa: <https://www.st1.fi/yrityksille/tuotteet-ja-palvelut/poltonesteklinikka/velvoitteet-ja-standardit>

TEM (2021). Työ ja elinkeinoministeriö (TEM). Biopolttoaineet ja bionesteet. Verkkosivusto. Viitattu 16.3.2021. Saatavissa: <https://tem.fi/biopolttoaineet>