



Euroopan unionin
rahoittama
NextGenerationEU



Metsäteho
LUOMASSA MAHDOLLISUUKSIA

Metsätehon raportti 271
28.1.2025

METSÄYHTIÖIDEN AUTOKULJETUSTEN SÄHKÖISTÄMINEN (MESI)

Kustannus- ja päästövaikutusten laskelmat

Pirjo Venäläinen
Asko Poikela
Riku Tarvainen

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

METSÄTEHO OY
Vernissakatu 1
01300 Vantaa

www.metsateho.fi

METSÄYHTIÖIDEN AUTOKULJETUSTEN SÄHKÖISTÄMINEN (MESI)

Kustannus- ja päästövaikutusten laskelmat

Pirjo Venäläinen
Asko Poikela
Riku Tarvainen

Metsätehon raportti 271
28.1.2025

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

© Metsäteho Oy

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
1 JOHDANTO	4
2 LASKELMIEN TOTEUTUS JA OLETUKSET.....	5
2.1 Laskelmien toteutus ja lähteet	5
2.2 Ajoneuvoja ja latausta koskevat laskentaperusteet ja oletukset	5
2.3 Lataus- ja taukoajkojen laskelmat.....	8
Laskelmissa käytettiin seuraavia oletuksia:.....	9
2.4 Päästöjä koskevat laskentaperusteet ja oletukset.....	10
3 KUSTANNUS- JA PÄÄSTÖVERTAILUIDEN TULOKSET.....	12
3.1 Ajoneuvokohtaiset vuosi- ja yksikkökustannukset.....	12
3.1.1 Metsäauton kustannusvertailu	13
3.1.2 Terminaaliauton kustannusvertailu	14
3.1.3 Hakeauton kustannusvertailu.....	16
3.2 Skenaariot valtakunnallisista vuositason vaikutuksista	17
4 KULJETUSTEN PÄÄSTÖJEN JA KUSTANNUSTEN MUITA TEKIJÖITÄ JA NIIDEN KEHITYSNÄKYMÄ.....	19
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	22
LÄHTEET.....	24

TIIVISTELMÄ

Metsäyhtiöiden autokuljetusten sähköistyminen (MESI) -hankkeen tavoitteena on tuottaa metsäyhtiöille ja metsäsektorin kuljetusyrityksille tietopohjaa täyssähköisiä autokuljetusratkaisuita koskevan päätöksenteon tueksi. Tässä osaraportissa verrataan sähkö- ja dieselkäyttöisten ajoneuvoyhdistelmien kustannuksia ja päästöjä puutavara- ja hakekuljetuksissa. Puutavara-autojen osalta tarkasteltiin sekä metsästä lähteviä metsäautoja että terminaalien ja tehtaiden välillä liikennöiviä terminaaliautoja.

Vertailulaskelmat laadittiin loppuvuodesta 2024 käytössä olleiden tutkimus- ja mallinnustietojen pohjalta. Laskelmien täydentäminen ja tarkentaminen jatkossa on tarpeen, koska vähintään 68-tonnisten täyssähköyhdistelmien seurantatutkimukset Pohjois-Euroopan olosuhteissa ovat pääosin vasta aluillaan. Suomessa ja Ruotsissa käynnissä olevista tutkimuksista tullaan kuitenkin saamaan lisätuloksia jo vuoden sisällä.

Selvityksessä tehtiin erillisiä tarkasteluja sähkökuorma-auton latauksen yhdistämisestä kuljettajien taukoaikoihin. Latauksesta syntyvää ylimääräistä työaikaa vältetään parhaiten terminaaliautoilla, joilla on 50 kilometrin kuljetusmatka. Metsäautoilla ylimääräistä työaikaa syntyy selvästi vähemmän silloin, kun kuljetusmatkalla oli käytössä megawattitehoiset latausasemat.

Kuorma-autojen kustannusvertailussa laadittiin herkkyystarkasteluja käyttövoiman ja sähköisen vetoauton hankintahinnan, akun käyttöiän ja latausasemien lukumäärän mukaan. Näihin kaikkiin tulee jo lähivuosina vaikuttamaan paljon sähköisten kuorma-autojen ja niiden latausasemien tekninen ja markkinakehitys sekä tuleva liikenteen päästövähennyksiä koskeva sääntely.

Herkkyystarkasteluiden perustason laskelmissa sähköisillä ajoneuvoyhdistelmillä puutavaran kuljetus on 7–11 % kalliimpaa ja hakkeen 6 % kalliimpaa kuin dieselyhdistelmällä. Sähköyhdistelmällä kuljettaminen tulee halvemmaksi tapauksissa, joissa ladattavan sähkön hinta on 0,15 €/kWh. Valtakunnallisella tasolla huonoimman skenaarion mukainen laskelma nostaa puutavara- ja hakekuljetusten kustannuksia 17,1 milj. €/v. Tarkastellussa parhaassa skenaariossa kuljetukset sähköisillä yhdistelmillä toisivat 3,4 milj. €:n vuosittaiset säästöt.

Selvityksessä laskettiin sähkökuorma-autojen vaikutukset kuljetusten päästöihin vain kuljetusten aikaisten (tank-to-wheel) päästöjen osalta. Tällöin sähkökuorma-autot lasketaan nollapäästöisiksi. Selvityksen valtakunnallisessa skenaariossa 20 % puutavaran ja 25 % hakkeen autokuljetuksista oletettiin sähköistetyiksi. Tällöin vuositasolla voitaisiin vähentää CO₂-päästöjä 43 000 tonnia. Jatkossa on tarpeen tehdä päästövertailuita myös polttoaineen elinkaaren osalta (well-to-wheel) ja ajoneuvojen valmistuksen elinkaari vaikutusten osalta. Laskentaperiaatteita on tarpeen tarkentaa kansallisesti ottaen huomioon Suomen kansallinen uusiutuvien polttoaineiden jakeluvelvoite ja uusiutuvan liikennesähköön osuus.

Selvityksen lopuksi tunnistettiin useita jatkotutkimustarpeita: 1) sähkökuorma-autojen kulutus mm. eri lämpötiloissa, liikennöintiympäristöissä sekä kuormaus- ja purkuvaiheissa, 2) akkujen kesto- ja käyttöikä ja korjattavuutta koskeva tutkimus ja kehitysnäkymät, 3) megawattilataukseen soveltuvien kuorma-autojen kustannukset ja 4) latausinfraa koskeva tutkimus (julkisen latausinfra-verkon kehittyminen ja akkuvarastojen hyödyntäminen osana yksityistä latausinfraa).

1 JOHDANTO

Metsäyhtiöiden autokuljetusten sähköistyminen (MESI) -hankkeen tavoitteena on tuottaa metsäyhtiöille ja metsäsektorin kuljetusyrityksille tietopohjaa täyssähköisiä autokuljetusratkaisuita koskevan päätöksenteon tueksi. Näin pyritään edistämään yhtiöiden valmiutta toimenpiteisiin eri aikajänteillä (esim. ensimmäiset investoinnit ja kokeilut alkuvaiheessa, laajemmat investoinnit myöhemmin). Hankkeessa laaditaan toteutettavuusselvitys raskaan liikenteen sähköistämisestä metsäteollisuuden autokuljetuksissa Suomessa. Hankkeen tarkempi kuvaus ja jo valmistuneet selvitykset löytyvät hankesivulta <https://www.metsateho.fi/mesi>.

MESI-hanke on Metsäteho Oy:n toteuttama ja osarahoittama. Lisäksi hanke saa liikenne- ja viestintäviraston Traficomin myöntämää sähköisen raskaan liikenteen valtionavustusta¹. Hanke toteutetaan aikajaksolla 1.10.2023–31.8.2025. Hankkeen ohjausryhmään kuuluvat Koskisen Oy:n, Metsä Groupin, Metsähallitus Metsätalous Oy:n, Stora Enso Oyj:n ja UPM-Kymmene Oyj:n edustajat.

Tässä osaraportissa verrataan sähkö- ja dieselkäyttöisten ajoneuvoyhdistelmien kustannuksia ja päästöjä metsäsektorin kuljetuksissa. Selvityksen painotus on puutavara- ja sivutuotehakkeen kuljetuksissa. Vertailulaskelmat toteutettiin kahdella tasolla: ajoneuvoyhdistelmäkohtaisesti sekä valittujen skenaarioiden osalta valtakunnallisella tasolla. Metaanikäyttöisten metsäsektorin ajoneuvoyhdistelmien vertailua dieselyhdistelmiin on tehty Juntusen (2023) ja Huuskosen (2024) opinnäytetöissä. Vertailulaskelmien lisäksi raportissa on kuvattu kirjallisuuden ja haastatteluiden pohjalta kustannustekijöiden nykytilaa ja kehitysnäkymiä myös niiltä osin, kuin niitä ei ole otettu huomioon itse laskelmissa.

Kiitämme Scania Suomi Oy:tä, Volvo Finland Ab:tä sekä Suomen Kuljetus ja Logistiikka SKAL ry:tä osaraporttia varten toimitetuista aineistoista.

¹ <https://traficom.fi/fi/sahkoinenliikenne>

2 LASKELMIEN TOTEUTUS JA OLETUKSET

2.1 Laskelmien toteutus ja lähteet

Sähkö- ja dieselkäyttöisten ajoneuvoyhdistelmien vertailulaskelmat toteutettiin hyödyntäen Metsätehon puutavara- ja hakeyhdistelmien kuljetuskustannusmalleja ja kuljetusten MCounter-päästölaskentamallia. Mallien aiempia oletuksia täydennettiin ja päivitettiin ajoneuvovalmistajien haastatteluiden ja sähköautomallinnusten pohjalta. Sähkökuorma-autojen kulutustasojen määrittelyssä otettiin huomioon myös tuoreita simulointitutkimuksia (Pernestål ym. 2023, Pihlatie ym. 2023, Tuviala ym. 2024, Werre 2023). Huomioon otetuissa tutkimuksissa oli puutavarayhdistelmien lisäksi mukana kappaletavarayhdistelmien tutkimuksia, koska sähköisistä hakeyhdistelmistä ei ole vielä omia tutkimuksiaan. Latausta koskevissa oletuksissa hyödynnettiin mm. Ramboll Finland Oy:n MESI-hanketta varten toteuttamaa sähkökuorma-autojen latausinfrastrukturin selvitystä (Käsnänen ym. 2024) ja sen taustalaskelmia. Dieselyhdistelmien kustannus- ja polttoaineen kulutustasoja on selvitetty aiemmin mm. HCT-tutkimusten yhteydessä (Venäläinen ja Poikela 2024).

Sähkö- ja dieselkuorma-autojen kustannus- ja päästövertailuun on tarjolla myös julkisia laskentamalleja. Ko. mallit soveltuvat parhaiten kappaletavarayhdistelmien vertailuun, eikä niissä ole otettu huomioon puutavara- ja hakeyhdistelmien erityispiirteitä. Tarjolla olevia laskentamalleja ovat esimerkiksi:

- Tampereen yliopiston HEETRA-malli <https://research.tuni.fi/verne/heetra/>
- Traficomien vertailulaskuri <https://tieto.traficom.fi/fi/tietotraficom/ajoneuvojen-paasto-ja-kustannuslaskurit/paketti-ja-kuorma-autojen-paasto-ja>
- Ruotsin REEL-hankkeen kustannuslaskentatyökalu <https://closer.lindholmen.se/nyheter/nytt-berakningsverktyg-optimerar-laddning-elektriska-lastbilsflottor>.

2.2 Ajoneuvoja ja latausta koskevat laskentaperusteet ja oletukset

Selvitys painottui 76-tonnisiin ajoneuvoyhdistelmiin, koska ko. painoluokat kattavat valtaosan Suomen puutavara- ja hakeyhdistelmien kuljetuksista. Ruotsin tutkimuksissa on mukana myös HCT-kokoluokan täyssähköyhdystelmiä. SCA:n sähköinen terminaaliyhdistelmä ajaa rajatuilla alueilla 80-tonnisena (SCA 2024). Skogforskin TREE-hankkeessa tullaan pilotoimaan 90-tonnista HCT-yhdistelmää. 98-tonnisen hakeyhdistelmän sähkönkulutusta on arvioitu mallintamalla (Uhrdin ym. 2023).

Vertailtujen yhdistelmien ominaisuudet peruslaskelmissa on esitetty taulukoissa 1–2. Peruslaskelmien lisäksi laadittiin herkkyystarkastelut, joissa käytetyt oletukset on kuvattu taulukossa 3. Vertailukohteena käytettiin vain 76-tonnisia dieselyhdistelmiä. Kuljetusmatkana käytettiin pääosin 100 kilometriä, joka on lähellä suorien puutavara-autokuljetusten keskimääräistä kuljetusmatkaa (Strandström 2024). Terminaalien ja tehtaiden välisissä kuljetuksissa tarkasteltiin myös 50 kilometrin matkoja. Sähköisten kuorma-autojen latauksesta johtuvaa lisätyöaikaa on tarkasteltu erikseen luvussa 2.3.

Taulukko 1. Yhdistelmien peruslaskelmissa käytetyt keskeiset oletukset.

Laskelman osatekijä	Diesel 76 t	Sähkö 68 t	Sähkö 76 t
Puutavarayhdistelmä (metsäauto M)			
Kuljetusmatka km	100		
Omapaino t (+kuormain t)	22,5+4=26,5	20,3+4=24,3	24,8+4=28,8
Hyötykuorma t (kuormain pois)	53,5	47,7	51,2
Kulutus (litraa tai kWh)			
<i>Kulutus kuormattuna / 100 km</i>	64,5	257,8	287,6
<i>Kulutus tyhjänä / 100 km</i>	45,6	154,7	172,5
<i>Kulutus kuormaus / kuorma</i>	8,37	31,33	34,96
<i>Kulutus purku / kuorma</i>	2,30	15,33	17,10
Puutavarayhdistelmä (terminaaliauto T)			
Kuljetusmatka km	100	-	50
Omapaino t (ei kuormainta)	21,0	-	23,3
Hyötykuorma t	55,0	-	52,7
Kulutus (litraa tai kWh)			
<i>Kulutus kuormattuna / 100 km</i>	61,0	-	280,6
<i>Kulutus tyhjänä / 100 km</i>	41,0	-	168,3
<i>Kulutus kuormaus / kuorma</i>	2,01	-	8,85
<i>Kulutus purku / kuorma</i>	1,89	-	8,31
Sivutuotehakeyhdistelmä H			
Kuljetusmatka km	100		
Omapaino t	26,5	25,8	28,8
Hyötykuorma t	49,5	42,2	47,2
Kulutus			
<i>Kulutus kuormattuna / 100 km</i>	66,4	225,0	294,5
<i>Kulutus tyhjänä / 100 km</i>	42,6	135,0	176,7
<i>Kulutus kuormaus / kuorma</i>	1,74	5,96	7,51
<i>Kulutus purku / kuorma</i>	3,72	12,32	16,08

Metsäauto = Metsästä puun käyttöpaikkaan tai terminaaliin liikennöivä puutavarayhdistelmä

Terminaaliauto = Terminaalien ja/tai tehtaiden välillä liikennöivä puutavarayhdistelmä

Taulukko 2. Tarkasteltuja yhdistelmiä koskevat yhteiset oletukset peruslaskelmissa.

Massan osalta täysi menokuljetus ja tyhjä paluukuljetus (keräilyajojen ja meno-paluukuljetusten käyttöä ei oteta huomioon)	Sähkökuorma-auton erot dieselkuorma-autoon nähden -Lisäpaino +2 tonnia -Vetoauton hankintahinta kaksinkertainen
Latausinfran teho 350 kW	Käyttövoimien hinnat (ilman alv) -Diesel 1,565 €/litra (ka. hinta 2023) -Sähkö 0,25 €/kWh
Sähköauton kulutus Keski-Suomen vuositason keskilämpötilan (+4,2 °C) mukaan (autovalmistajien tekemien kulutusmallinnusten osalta)*	Akun latauksesta johtuva lisäaika huomioidaan mutta ei mahdollista lisämatkaa latausinfran luo (latausinfraverkon kattavuutta käsitellään MESI-hankkeen myöhemmässä raportissa)
Sähköautolla oletetaan 1 akunvaihto vetoauton pitoajan puolivälissä ja sen vaihtoarvoksi oletetaan 20 % uuden hinnasta. Akun hinta-oletus on 200 €/kWh (Tuviala ym. 2024). Akun käyttöikää eri ajomäärillä ja ajoympäristöissä on tarpeen tarkentaa jatkotutkimuksissa.	Oletetaan samaksi diesel- ja sähköautoilla, koska raskaista yhdistelmistä ei ole näiden osalta vielä tarpeeksi kokemuksia: -Korjaus- ja huoltokustannukset (riippuvat akun kunnosta ja voimalinjojen eroista)** -Rengaskustannukset -Vakuutusmaksut -Liikennöinti- ja katsastusmaksut -Hallinto- ja ylläpitokustannukset
Kustannusvertailut tehdään olettaen, että kuljetusyritys ostaa sähköisen vetoauton , vaikka tällä hetkellä sähköisiä vetoautoja suurissa kokoluokissa on tarjolla vain leasing-sopimuksilla.	

*Volvo Finland Ab:n tekemissä metsä-, terminaali- ja haakeyhdistelmien mallinnoissa sähkönkulutus oli:

- -20 asteen pakkasessa reilut 20 % korkeampi kuin peruslaskelman +4,2 °C:n lämpötilassa
- +20 asteen lämmössä 12–15 % matalampi kuin peruslaskelman +4,2 °C:n lämpötilassa.

**Tampereen yliopiston HEETRA-mallissa (Liimatainen ym. 2023) täysperävaunullisilla kuorma-autoilla dieselyhdistelmän huolto- ja rengaskustannus on oletettu olevan 0,22 €/km ja sähköyhdistelmän 0,19 €/km. Toisaalta sähköisen ajokaluston huoltohenkilöstölle on tiukemmat osaamisvaatimukset.

Taulukot 3. Herkkyystarkasteluiden oletukset.

Laskentatekijä	Ero peruslaskelman oletukseen	Tarkennus tai perustelu
Sähköisen vetoauton hankintahinta €/auto	–100 000	Vuoden 2024 mukainen hankintatuki autoa kohden (50 000 €) ja muu vetoauton hintakehitys (50 000 €) mm. akkujen kehityksestä johtuen. Hankintatukea ehdotetaan jatkossakin kansallisessa jakeluinfraohjelmassa (Ojala ym. 2024)
Sähköisen vetoauton akun vaihto ja auton vaihto-arvo €/auto	–1 vaihto	Akku vaihdetaan kerran vetoauton ensimmäisen omistajan pitoajan puolivälissä
Dieselin hinta €/litra	±0,12	Nousu: Uusiutuvan polttoaineen jakeluvelfoite nousee 13,5 %:sta 22,5 %:iin vuonna 2027 (arvio kustannusvaikutuksesta Hallituksen esitys... 2024). Lasku: Vuoden 2024 hintataso on laskelmassa käytetyn tarkasteluvuoden (2023) tasoa matalampi
Sähkön hinta €/kWh	±0,1	Nousu: Hintakehitys on tällä hetkellä epävarmaa latausinfraan vähäisen määrän takia Lasku: Asiakasyrityksen luona tehtävässä latauksessa hintataso voi olla yleistä markkinahintaa alhaisempi 1.1.2025 voimaan tulleen lakimuutoksen mukaan yleisesti saatavilla olevan latausaseman uusiutuva liikennesähkö voidaan sisällyttää uusiutuvien polttoaineiden jakeluvelfoitteeseen. Tämän vaikutusta liikennesähkön hintaan on vaikea arvioida, mutta AFRYn (Sipilä ym. 2023) mukaan se laskisi hintaa korkeintaan 0,14 €/kWh. Akkuvarastot ovat yleistynvä keino hyödyntää halvempaa yösähköä myös päiväajan latauksissa.
Latausinfraan teho kW	+650	Megawattilataus (tässä 1 MW) lyhentää latauksen kestoa ja siten latauksesta johtuvaa kuljettajan ylimääräistä työaikaä. Megawattilatauksen oletetaan yleistynvän jatkossa, kun megawattilatauksen standardi valmistuu vuoden 2025 aikana.

2.3 Lataus- ja taukoajkojen laskelmat

Sähköisten kuorma-autojen lataukseen kuluvaä aikaä ja latauksen yhdistämistä kuljettajien taukoajkoihin tarkasteltiin erillisillä esimerkkilaskelmilla, jotka laskettiin kuorma-autokohtaisesti yhden vuorokauden ajalta (taulukko 4 ja liite 1).

Taulukko 4. Esimerkkejä kuljettajien taukoajkojen yhdistämisestä kuorma-auton latauksen yhteyteen.

nro	Yhdistelmä	Kuljetusmatka km	Työvuorot/vrk	Akun va-raus vrk:n alussa kWh	Latauspisteiden lkm	Latausaika taukojen ulkopuolella min/kuorma
1	76MS	100	3	407	2	37,5
2	76MS	100	2	582	2	22,5
3	76TS	100	3	407	2	35,9
4	76TS	100	2	582	2	17,4
5	76TS	50	3	407	1	16,0
6	76TS	50	2	582	2	5,0
7	76HS	100	3	407	2	36,4
8	76MS	100	3	407	2*	45,0
9	76MS	100	3	407	2 (MW)**	16,3

*Muista tilanteista poiketen latauspiste tuotantolaitoksen ulkopuolella sijaitsee kuljetusmatkan puolivälissä.

**Megawattilatauslaskelmassa vetoauton ominaisuudet on oletettu samoiksi kuin vertailussa 1.

Laskelmissa käytettiin seuraavia oletuksia:

- Kuljettaja pitää 45 minuutin tauon viimeistään, kun työaika kulunut on kulunut 5,5 h tai ajoaika 4,5 h.
 - Työajasta seuraava tauko perustuu Kuorma-autoalan työehtosopimukseen ja ajoajasta seuraava tauko EU:n ajo- ja lepoaika-asetukseen.
 - Mahdollisuutta jakaa tauko 15 ja 30 minuutin osuuksiin ei otettu huomioon.
- Kuljettaja pitää tauon aina auton lataamisen yhteydessä.
 - Kaikissa latauspaikoissa kuljettajan tauon pitäminen ei ole välttämättä mahdollista (mm. puutteelliset taukotilat). Tätä ei ole otettu laskelmissa huomioon.
 - Kun lataus voidaan tehdä kuljettajan työehtosopimuksen tai ajo- ja lepoaika-asetuksen mukaisen tauon aikana, on ko. latausaika merkitty liitteessä x vihreällä.
 - Jos kuljettaja joutuu lataamaan ajoneuvon uudestaan ennen kuin edellytys tauolle on syntynyt, merkitään ko. latausaika punaisella. Tämä on sähköauton latauksesta johtuvaa ylimääräistä työaika. Vuorokauden aikana syntyvistä normaalitaukojen ulkopuolisista latausajoista laskettiin kuormakohtainen keskiarvo, joka on otettu huomioon luvun 3 kustannuslaskelmissa.
 - Mikäli lataustarve on syntynyt kuljettajan työvuoron alkuvaiheessa, on joissakin laskelmissa kuljettaja pitänyt ensin lyhyemmän ns. punaisen lataustauon ja normaalin ns. vihreän tauon vasta myöhemmin työvuoron aikana.
- Kuljettajien työvuoron vaihto voidaan tehdä kesken ajomatkan ja kuorma-auton latauksen, mutta ei kesken auton kuormaus- tai purkuvaiheen.
- Kuljettajilla on vuorokauden aikana joko kaksi noin 10 tunnin työvuoroa tai kolme 8 tunnin työvuoroa.
 - 10 tunnin työvuoroissa ajoneuvon latausta tehdään myös työvuorojen välissä, 8 tunnin työvuoroissa latausajat ovat täysin työvuorojen sisällä.
- Kuorma-auton latausmahdollisuus on aina toimituskohteessa (metsäyhtiön tuotantolaitoksella tai terminaalissa) ja/tai heti kuormauksen jälkeen (poikkeuksena esimerkiksi 8, jossa toinen latauspaikka kuljetusmatkan puolivälissä).
 - Laskelmassa ei oteta kantaa latausaseman tarkkaan sijoittumiseen ajoneuvon kuormauspäässä, vaan se voi olla esim. 5–20 km:n ajokilometrin jälkeen. Ruotsin TREE-hankkeessa tullaan testaamaan myös puutavarayhdistelmän latausta siirrettävällä latausratkaisulla (Danebergs 2024).
 - Latausta ei tehdä samanaikaisesti auton kuormauksen tai purun yhteydessä, vaikka tämä ei ole välttämättä täysin poissuljettu mahdollisuus.

- Maksimiakkukapasiteettina käytettiin 582 kWh:a ja 70 %:n SOC-ikkunaa (State of Charge) eli 407 kWh.
- Kuorma-autojen sähkönkulutus ja latausajat perustuvat luvussa 2.2 kuvattuihin oletuksiin.

Selvityksessä tehtiin laskelmia metsäalan yleisillä kuljetusmatkoilla ja yhdistelmien painoluokilla. Keskimääräinen latausaika kuljettajataukojen ulkopuolella vaihteli 5–45 minuutin välillä per kuorma. Metsästä lähtevissä kuljetuksissa tyypillinen 100 km:n kuljetusmatka tehtaalte on sähkökuorma-autolle haastava. Yhdistelmän koosta riippuen matkalla kuluu tyhjänä vähintään 180 kWh ja kuormattuna yli 300 kWh, jolloin edestakainen matka onnistuu vain täyteen ladatulla akulla. Akun täyteen lataamista (SOC 100 %, akun varaus 582 kWh) tarkasteltiin vain kahden työvuoron malleissa, ja siinä tapauksessa lataus- ja taukoaikojen yhteensovittaminen onnistui hieman paremmin. Akun jatkuva täyteen lataaminen kuitenkin lyhentää akun kestoikää. Merkittävä tekijä on myös latausteho. 1 MW:n latausteholla metsäauton lataukseen menee vain 35 % verrattuna 350 kWh:n lataukseen.

Tässä toisaalta rajoittava tekijä oli latauspaikkojen määrä. Jos latauspaikkoja on vain kuorma- ja purkupään läheisyydessä, joudutaan akkua lataamaan, vaikka varaustaso ei sitä vielä vaatisi. Tämä johtuu siitä, ettei matkan varrella ole latausmahdollisuutta, ja 100 km:n matka vaatii suhteellisen paljon varausta. Osittain tästä syystä 50 km:n kuljetusmatkan tarkasteluissa latausta taukojen ulkopuolella tulee huomattavasti vähemmän, koska akun kapasiteetti pystytään käyttämään paremmin hyväksi.

Vaikka latauslaskelmia tarkastellaan minuutin ja yhden kilowatin tarkkuudella, on ne siitä huolimatta suuntaa antavia keskimääräisistä oletustiedoista johtuen. Sähkökuorma-auton kulutukseen, akun varaustasoon ja ajankäyttöön vaikuttaa mm. ulkoilman lämpötila, reitin mäkyisyys ja metsäteiden osuus vrt. päällystetyn tien osuus. Tarkasteltujen sähkökuorma-autojen latausajan kohtaa ja latauksen kestoa voitaisiin optimoida tarkemmin mallinnustyökaluja hyödyntäen.

2.4 Päästöjä koskevat laskentaperusteet ja oletukset

Tässä raportissa sähkökuorma-autojen vaikutukset kuljetusten päästöihin on laskettu vain kuljetusten aikaisten suorien päästöjen (tank-to-wheel) osalta. Dieselin CO₂-päästökerroin Suomessa vaihtelee lähes vuosittain uusiutuvan polttoaineen jakeluvelvoitteen mukaan ja oli 2,125 kg/litra vuonna 2023 (Tilastokeskus 2024b). Sähkökuorma-auto lasketaan käytön aikana nollapäästöiseksi.

Jatkossa on tarpeen tehdä päästövertailuita myös:

- polttoaineen elinkaaren osalta (well-to-wheel-päästöt) ja
- ajoneuvojen valmistuksen elinkaarivaikutusten osalta.

EU:ssa on käsitellyssä CountEmissionsEU-ehdotus, jonka tavoitteena on kuljetusketjujen kasvi-huonekaasupäästöjen laskennan yhtenäistäminen. Ehdotuksessa viitataan SFS EN ISO 14083:2023 -standardin mukaiseen kuljetusten päästölaskentaan. Laskentaan tulee sisällyttää käytön aikaisten CO₂e-päästöjen lisäksi käyttövoimien elinkaaripäästöt, mutta kuljetuskaluston valmistamisen päästöt on rajattu laskennan ulkopuolelle. Standardissa itsessään mainituissa kansainvälisissä päästökertoimissa ei oteta huomioon kansallisia uusiutuvien polttoaineiden jakeluvelvoitteita tai uusiutuvan sähkön osuutta sähköntuotannossa. Kansallisesti onkin tarpeen tarkentaa päästöjen laskentaperiaatteita eri toimijoiden laskelmien vertailtavuuden varmistamiseksi.

Ilmastopaneelin raportin (Seppälä ym. 2024) laskelmissa dieselikäyttöisen perävaunullisen yhdistelmän valmistuksen päästönä on käytetty arvoa 1,2 t CO₂e / ajoneuvon painotonnia kohden ja sähköikäyttöisen 1,03 t CO₂e / ajoneuvon painotonnia kohden.

EU:n RED III -direktiivin ja Suomen 1.1.2025 uudistetun jakeluvelvoitelain myötä myös julkisen latausinfraan uusiutuva liikennesähkö sisältyy kansalliseen jakeluvelvoitteeseen. Tämä tulee vähentämään bio-osuutta dieselissä (Seppälä ym. 2024). Ko. vaikutusta ei ole arvioitu tämän raportin laskelmissa, mutta jatkolaskelmissa bio-osuuden muutokset tulee ottaa huomioon.

3 KUSTANNUS- JA PÄÄSTÖVERTAILUIDEN TULOKSET

Puutavara- ja hakekuljetuksissa käytettävien diesel- ja sähkökuorma-autoja vertailtiin toisiinsa kustannusten ja päästöjen osalta

- ajoneuvokohtaisesti vuositasolla ja kuljetettua kuormayksikköä kohden
- valtakunnallisissa skenaarioissa, joissa oletettiin sähkökuorma-autojen kuljetusmäärille tietyt osuudet.

Laskelmissa käytettyjä oletuksia on kuvattu tarkemmin edellisessä luvussa 2.

3.1 Ajoneuvokohtaiset vuosi- ja yksikkökustannukset

Sähköisen ja dieselkuorma-auton kustannuksia kuljetusyrityksen näkökulmasta vertailtiin herkkyystarkasteluilla, jotka on kuvattu tarkemmin taulukoissa 5–9. Lähtökohtana oli perustason laskelma, jonka oletuksiin tehtiin kussakin herkkyystarkastelussa muutoksia (vetoauton hinta, akun vaihtojen lukumäärä pitoaikana, dieselin ja sähkönn hinnat). Kullekin herkkyystarkastelulle tehtiin vielä lisätarkastelut ajoneuvon vuorokausikohtaisten työvuorojen lukumäärän mukaan, ja metsäautolla myös latauspaikkojen lukumäärän ja latausinfraan lataustehon mukaan.

Taulukko 5. Sähkö- ja dieselyhdistelmien kustannusten herkkyystarkastelut 1.

Tarkastelu	Sähköisen vetoauton hinta	Akun vaihtojen lkm	Dieselinhinta €/litra	Sähkön hinta €/kWh
Perustaso	x	1	1,565	0,25
Hankintahinta–	–100 000	1	1,565	0,25
Käyttövoima+	x	1	1,685	0,35
Käyttövoima–	x	1	1,445	0,15
Akun kesto+	x	0	1,565	0,25

Taulukko 6. Metsäautojen kustannusten herkkyystarkastelut 2.

Tarkastelu	Käyttövoima	Työvuoroja/vrk	Latauspaikkojen lkm reitillä	Latausteho, kW
Diesel 3-vuorotyö	Diesel	3		
Diesel 2-vuorotyö	Diesel	2		
Sähkö, 3-v, 2 lp	Sähkö	3	2	350
Sähkö, 3-v, 1 lp	Sähkö	3	1*	350
Sähkö, 3-v, 2 MWC	Sähkö	3	2	1 000
Sähkö, 2-v, 2 lp	Sähkö	2	2	350

*Latauspaikan oletetaan sijaitsevan ajoreitin varrella noin kuljetusmatkan puolivälissä, jolloin auto kohtaa sen reitillään kahteen kertaan.

Taulukko 7. Terminaaliautojen (100 km) kustannusten herkkyystarkastelut 2.

Tarkastelu	Käyttövoima	Työvuoroja/vrk	Latauspaikkojen lkm reitillä	Latausteho kW
Diesel 3-vuorotyö	Diesel	3		
Diesel 2-vuorotyö	Diesel	2		
Sähkö, 3-v, 2 lp	Sähkö	3	2	350
Sähkö, 2-v, 2 lp	Sähkö	2	2	350

Taulukko 8. Terminaaliautojen (50 km) kustannusten herkkyystarkastelut 2.

Tarkastelu	Käyttövoima	Työvuoroja/vrk	Lataus- paikkojen lkm reitillä	Latausteho kW
Diesel 3-vuorotyö	Diesel	3		
Diesel 2-vuorotyö	Diesel	2		
Sähkö, 3-v, 1 lp	Sähkö	3	1	350
Sähkö, 2-v, 1 lp	Sähkö	2	1	350

Taulukko 9. Hakeautojen kustannusten herkkyystarkastelut 2.

Tarkastelu	Käyttövoima	Työvuoroja/vrk	Lataus- paikkojen lkm reitillä	Latausteho kW
Diesel 3-v	Diesel	3		
Sähkö 3-v, 2 lp	Sähkö	3	2	350

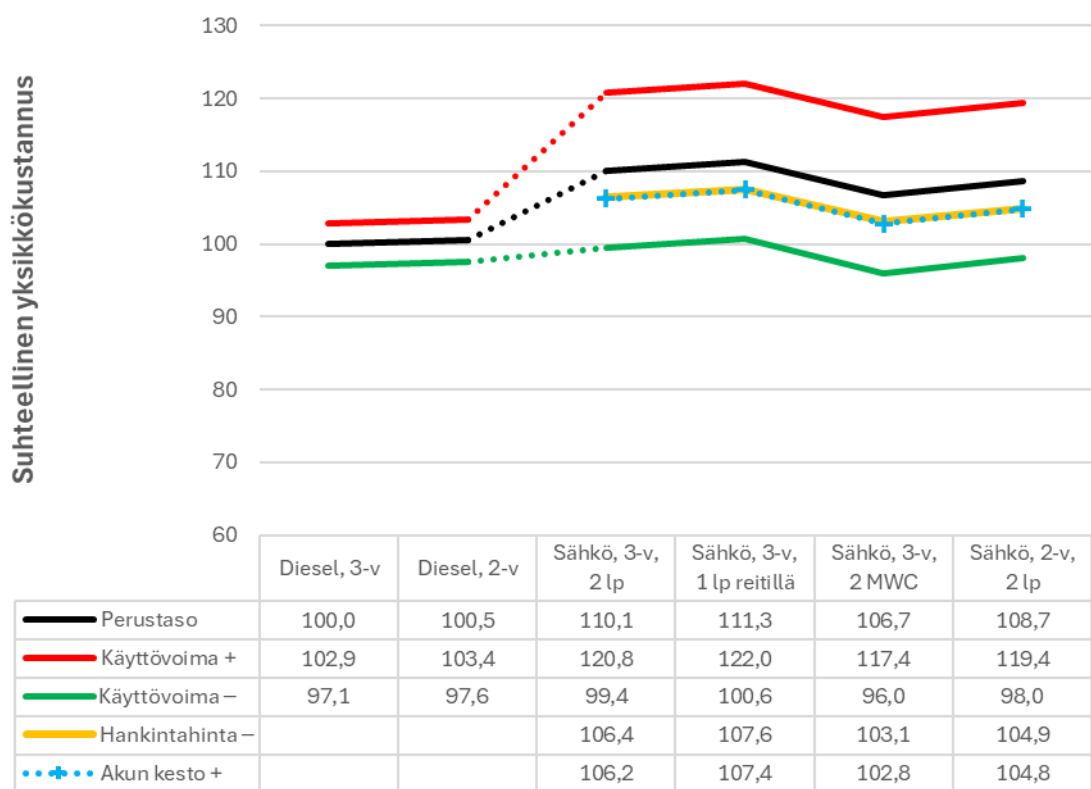
3.1.1 Metsäauton kustannusvertailu

Diesel- ja sähköauton kustannusvertailua varten laskettiin ajoneuvokohtaiset vuosikustannukset (liite 2a) ja puukuljetuksen yksikkökustannukset (kuvio 1) eri lähtötiedoilla. Perustason laskelma- ja kuljetusten yksikkökustannukset ovat sähköisellä yhdistelmällä 7–11 % korkeammat kuin dieselyhdistelmällä.

Käyttövoimalaskelmissa oletettiin sähkönn hintalle selvästi suurempia hintaeroja kuin dieselille. Alkuvaiheessa liikennesähkön tarjonta on vielä hyvin rajoittunutta, ja toisaalta liikennesähköstä oletetaan ison osan ladattavan muualla kuin julkisissa latausasemissa. Liikennesähkön latauspaikkojen yleistessä sähkönn hintaa pystytään jatkossa arvioimaan tarkemmin. Perustason korkeampi sähkönn hinta (0,35 €/kWh) nostaa sähkö- ja dieselyhdistelmien välisen kustannuseron noin pariin kymmeneen prosenttiin. Perustason matalammalla sähkönn hinnalla (0,15 €/kWh) sähkökuorma-auton yksikkökustannukset laskevat hieman dieselyhdistelmää edullisemmiksi.

“Hankintahinta—” -laskelmassa sähköisen vetoauton hinnan pudotus 100 000 eurolla ei riitä siihen, että kuljetuskustannukset sähkökuorma-autolla laskisivat dieselyhdistelmää edullisemmiksi. Kustannusero pienenee 3–8 %:iin. Lähes sama kustannusvaikutus on sillä, että akkua ei ole tarpeen vaihtaa kesken vetoauton ensimmäisen omistajan pitoajan.

Sähkökuorma-autokuljetusten toteutusvaihtoehtoista edullisin on tilanne, jossa on käytössä kaksi megawattitason latausasemaa (näissä tosin ei ole arvioitu megawattilataukseen soveltuvan kuorma-auton hankintahintaa). Tällöin latauksesta ei synny ylimääräistä työaikakustannusta ja kuljetuskalustoa voidaan hyödyntää tehokkaasti.



Kuvio 1. Metsäauton yksikkökustannus (€/m³) eri herkkyytarkasteluissa (indeksi Perustaso: Diesel 3-v = 100)

Metsäautojen osalta laadittiin laskelmia käyttövoiman hintamuutoksista, joilla sähkö- ja dieselyhdistelmän yksikkökustannus muodostuu samaksi. Perustason kustannusoletuksiin nähden dieselin hinnan tulisi nousta 18–30 %, jotta diesel- ja sähköauton käytöllä olisi sama kustannus (taulukko 10). Toisaalta lataussähkön hinnan tulisi laskea perustasosta 25–42 %, jotta sähköisen yhdistelmän kustannus olisi samaa tasoa dieselyhdistelmän kanssa (taulukko 11).

Taulukko 10. Polttoaineen litrahinta, jolla dieselauton yksikkökustannustaso (€/m³) nousee sähköauton kustannustasolle 100 km:n kuljetusmatkalla, kun lataussähkön hinnaksi oletetaan perustason mukainen 0,25 €/kWh.

76 M, 3-v	= 76 MS, 3-v, 2 lp	1,986 €/l	(+27 %)
	= 76 MS, 3-v, 1 lp reitillä	2,032 €/l	(+30 %)
	= 76 MS, 3-v, 2 MWC	1,842 €/l	(+18 %)
76 M, 2-v	= 76 MS, 2-v, 2 lp	1,903 €/l	(+22 %)

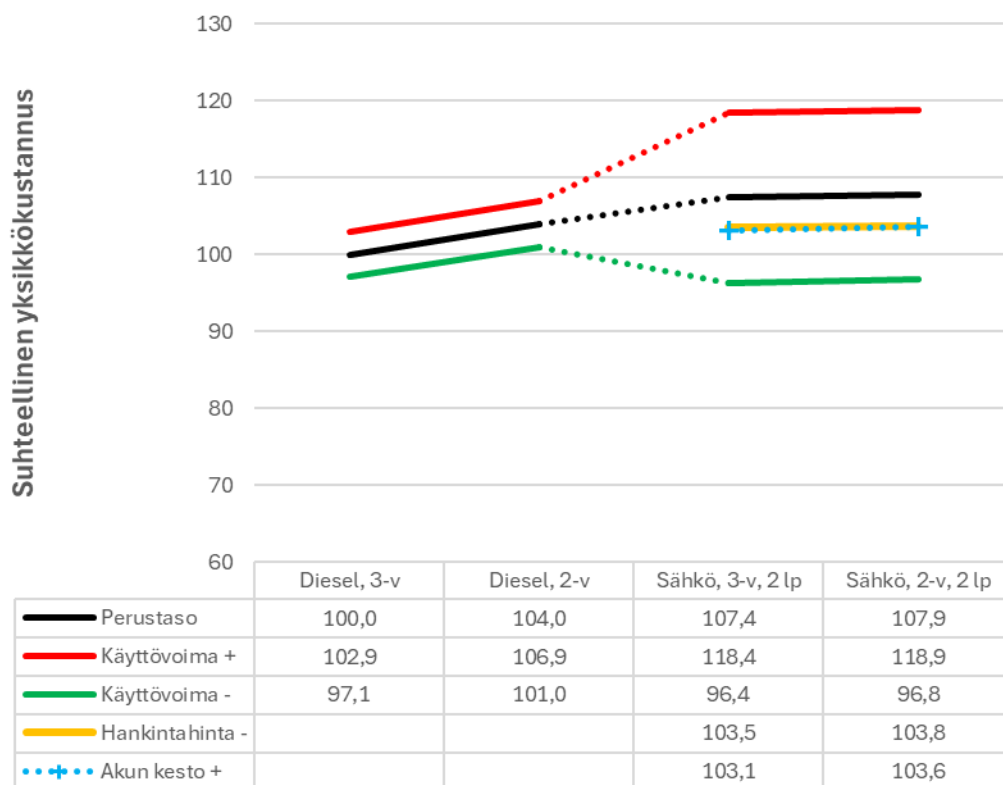
Taulukko 11. Lataussähkön kWh-hinta, jolla sähköauton yksikkökustannustaso (€/m³) laskee dieselauton kustannustasolle 100 km:n kuljetusmatkalla, kun dieselin hinnaksi oletetaan perustason mukainen 1,565 €/litra.

76 MS, 3-v, 2 lp	=	0,155 €/kWh	(-38 %)
76 MS, 3-v, 1 lp reitillä	= 76 M, 3-v	0,144 €/kWh	(-42 %)
76 MS, 3-v, 2 MWC	=	0,187 €/kWh	(-25 %)
76 MS, 2-v, 2 lp	= 76 M, 2-v	0,173 €/kWh	(-31 %)

3.1.2 Terminaaliauton kustannusvertailu

Tehtaiden ja tuotantolaitosten välisten kuljetusten yksikkökustannuksia (€/m³) ja vuosikustannuksia sähkö- ja dieselyhdistelmällä tarkasteltiin kahdella kuljetusmatkalla (100 ja 50 km) (kuvio 2–

3 ja liite 2b). 100 kilometrin matkalle oletettiin kaksi latausasemaa ja 50 kilometrin matkalle yksi. 100 kilometrin matkan peruslaskelmassa sähköinen yhdistelmä tulee 7–8 % kalliimmaksi kuin dieselyhdistelmä. 50 kilometrin matkalla sähköinen yhdistelmä on 9–11 % kalliimpi. Kummallakin kuljetusmatkalla sähköinen yhdistelmä tulee dieselyhdistelmää halvemmaksi, jos sähkön hinta on 0,15 €/kWh.



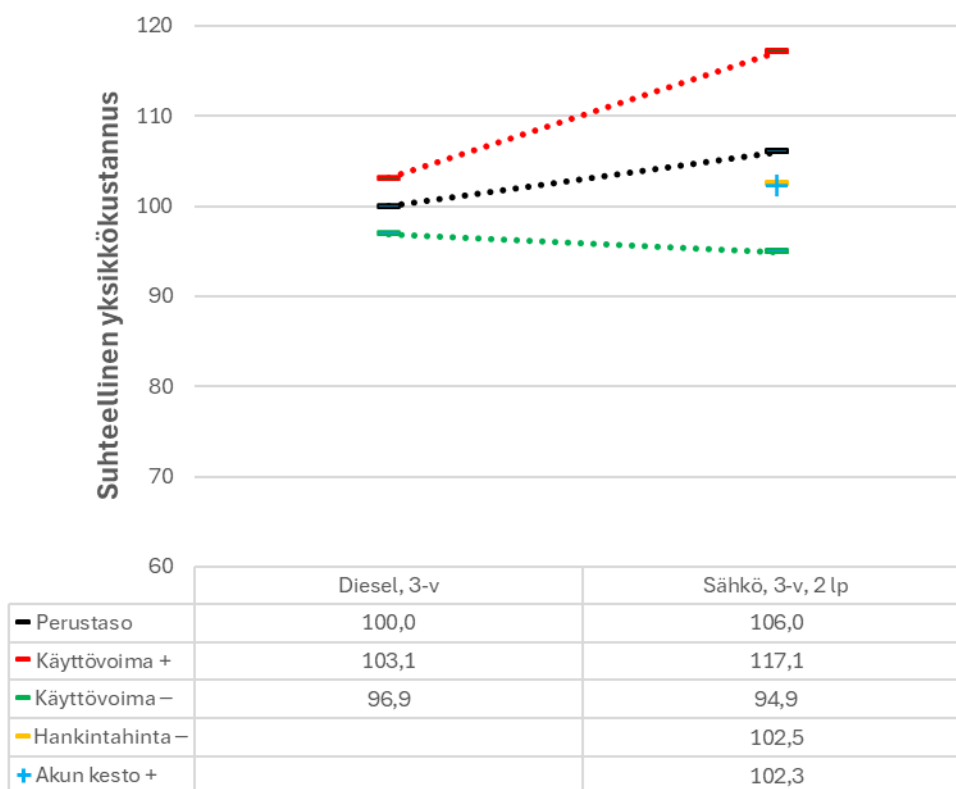
Kuvio 2. Terminaaliauton (100 km) yksikkökustannus (€/m³) eri herkkyyystarkasteluissa (indeksi Perustaso: Diesel 3-v = 100)



Kuvio 3. Terminaaliauton (50 km) yksikkökustannus (€/m³) eri herkkyystarkasteluissa (indeksi Perustaso: Diesel 3-v = 100)

3.1.3 Hakeauton kustannusvertailu

Hakeauton perustason laskelmassa kuljetus sähköisellä yhdistelmällä tulee 6 % kalliimmaksi kuin dieselyhdistelmällä (kuvio 4, vuositason kustannusrakenne liitteessä 2c). Kuten metsä- ja terminaaliyhdistelmälläkin, hakkeen kuljettaminen sähköisellä yhdistelmällä tulee perustason dieseliä halvemmaksi tapauksessa, jossa sähkön hinta on 0,15 €/kWh.



Kuvio 4. Hakeauton yksikkökustannus (€/m³) eri herkkyystarkasteluissa (indeksi Perustaso: Diesel 3-v = 100)

3.2 Skenaariot valtakunnallisista vuositason vaikutuksista

Sähkökuorma-autojen käytön kehittymistä metsäsektorin kuljetuksissa on tässä vaiheessa hyvin vaikea arvioida. Taulukoiden 12–13 skenaarioiden ja niiden pohjalta laskettujen vaikutusarvioiden tavoitteena on lähinnä havainnollistaa, minkä suuruisia vaikutuksia sähkökuorma-autojen käytöllä voisi vuositason olla. Puutavarayhdistelmien osalta skenaariossa on oletettu, että sähköistys tapahtuu samalla osuudella kuin on arvioitu maksimissaan 50 km:n kuljetuksia. Ko. kuljetusmatkan osuudeksi on arvioitu 20 % kuljetuksista perustuen Ramboll Finland Oy:n laatimaan puun optimointimallinnukseen (ks. tarkemmin Venäläinen ja Poikela 2024). Hakeyhdistelmille on oletettu korkeampi sähköistymisen aste (25 %) lyhyempien keskilähtömatkojen, parempitasoisten tieyhteyksien ja säännöllisempi kuljetusreittien takia. Skenaariotarkastelut tehtiin vain 76-tonnisille yhdistelmille ja puutavarakuljetusten osalta vain metsäautoille.

Skenaariotarkastelussa (taulukko 12) vertailtiin parhaimman ja huonoimman sähkökuorma-autoskenaariotarkastelun eroa perustason dieselyhdistelmään. Metsäautojen parhaassa skenaariossa puutavaran valtakunnalliset kuljetuskustannukset laskevat 2,6 miljoonalla eurolla vuodessa. Huonoimmassa skenaariossa puutavaran kuljetuskustannukset nousevat 14,4 miljoonaa euroa vuodessa. Hakeyhdistelmällä parhaassa sähkökuorma-autojen skenaariossa kuljetuskustannukset laskevat 0,7 miljoonaa euroa vuodessa ja huonoimmassa skenaariossa kuljetuskustannukset kasvavat 2,7 miljoonaa euroa vuodessa.

Edellä kuvatulla sähköistymisen osuudella sähkökuorma-autoilla voidaan saavuttaa 43 000 tonnin vuosittainen CO₂-päästövähennys puutavaran ja hakkeen autokuljetuksissa (taulukko 13).

Taulukko 12. Valtakunnallinen skenaario sähkökuorma-autojen kustannusvaikutuksista puutavara- ja hakekuljetuksissa. Skenaario on laskettu vuoden 2023 kuljetusvolyymilla ja kustannustasolla.

Yhdistelmätyyppi	Skenaario	Auto- kuljetus- volyymi milj. t/v*	Skenaario sähköistyk- sen osuus %	Kustannus- muutos milj. €/v
Metsäauto				
Paras skenaario	Käyttövoima—, 3-v, 2 MWC	34,9	20 %	-2,6
Huonoin skenaario	Käyttövoima+, 3-v, 1 lp			+14,4
Hakeauto				
Paras skenaario	Käyttövoima—	6,9	25 %	-0,8
Huonoin skenaario	Käyttövoima+			+2,7
YHTEENSÄ Paras		41,8	21 %	-3,4
YHTEENSÄ Huonoin				+17,1

*Tilastokeskus 2024a

Taulukko 13. Valtakunnallinen skenaario sähkökuorma-autojen päästövähennyksestä puutavara- ja hakekuljetuksissa. Skenaario on laadittu vuoden 2023 kuljetusvolyymilla ja päästökertoimella.

Yhdistelmätyyppi	CO ₂ -päästö- vähennys* kg/kuormatonni	Auto- kuljetus- volyymi milj. t/v**	Skenaario sähköistyk- sen osuus %	CO ₂ -päästö- vähennys 1 000 t/v
Puutavara-auto	4,8	34,9	20 %	34,1
Hakeauto	4,9	6,9	25 %	8,5
YHTEENSÄ		41,8	21 %	42,6

*CO₂-päästökerroin 2,125 kg/litra Tilastokeskus 2024b

**Tilastokeskus 2024a

4 KULJETUSTEN PÄÄSTÖJEN JA KUSTANNUSTEN MUITA TEKIJÖITÄ JA NIIDEN KEHITYSNÄKYMİÄ

Tähän lukuun on koottu sääntelytyössä, kirjallisuudessa ja haastatteluissa esille nousseita sähkö- ja dieselajoneuvoyhdistelmien vertailuun vaikuttavia teemoja, joita ei sisällytetty edellä Metsäteho Oy:n omiin laskelmiin (taulukot 14–15). Mainitun sääntelyn sekä teknisen ja markkinakehityksen seuraaminen on tarpeen, jotta nyt tehtyjä vertailulaskelmia voidaan jatkossa päivittää. Kehitysnäkymissä ei ole tarkasteltu latausinfraan kehittymistä, koska sitä tullaan käsittelemään tarkemmin MESI-hankkeen tulevassa selvityksessä.

Taulukko 14. Diesel- ja sähkökuorma-autojen vertailuun vaikuttavaa sääntelyä ja sen kehitysnäkymiä.

Tieliikenteen päästökauppa (2027)	Tieliikenteen päästökauppa käynnistyy Suomessa 2027. PEIKKO-hankkeen skenaariossa sen arvioidaan nostavan dieselin litrahintaa 0,13 €/l:lla vuonna 2028 (Koljonen ym. 2024). Paltan (2024) viittaamien analyysien mukaiset päästöoikeuden hinnat nostaisivat dieselin pumppuhintaa keskimäärin 0,44 €/litra. Hallituksen kehysriihessä tehtiin huhtikuussa 2024 päätös raskaan liikenteen ammattidieselin käyttöön otosta samanaikaisesti päästökaupan kanssa (Valtioneuvosto 2024). Ammattidieselin kustannuskompensaation suuruudesta ei ole vielä arviota, joten tähän selvitykseen ei sisälly arviota päästökaupan vaikutuksesta dieselin hinnan kehitykseen.
Uusiutuvan polttoaineen jakeluvelvoite	Taulukossa 3 esitetyn jakeluvelvoitteen lisäksi synteettisille uusiutuville polttoaineille (RFNBO-polttoaineet) tulee oma jakeluvelvoitteensa vuodesta 2028 lähtien (1,5 % vuosina 2028–2029 ja 4 % vuodesta 2030 lähtien).
EURO 7 -asetus (EU 2024/1257)	Toukokuussa 2024 voimaan astunut asetusta sovelletaan vuodesta 2029 lähtien uusiin kuorma-autoihin. Asetus asettaa vaatimuksia ajoneuvojen päästöjen vähentämiseksi (CO ₂ -päästöjen osalta katso raja-arvoasetus seuraavassa kohdassa). Lisäksi asetus asettaa vaatimuksia ajoneuvojen akkujen kestävyydelle.
Raskaan kaluston CO ₂ -raja-arvoasetus (EU 2019/1242)	Kesäkuussa 2024 tuli voimaan EU:n asetuspäivitys koskien uusien raskaiden kuorma-autojen ja niiden perävaunujen CO ₂ -päästöjen vähentämistä. Päästöjä tulee vähentää keskimäärin 45 % vuoteen 2030, 65 % vuoteen 2035 ja 90 % vuoteen 2040 mennessä. Suurimmille yhdistelmien kokoluokille (extra heavy combination, EHC) on työn alla oma laskentatapansa, jotta niiden parempi energiatehokkuus voidaan ottaa vaatimuksissa huomioon.
Liikenteen verotuksen kokonaisuudistus	Suomen liikenteen verotuksen ja rahoituksen kokonaisuudistusta valmisteleavan työryhmän työ käynnistyi syksyllä 2024 ja valmistuu loppuvuonna 2026. Uudistuksessa otetaan huomioon päästövähennysvelvoitteiden vaikutukset liikenteen kustannuksiin. (Valtiovarainministeriö 2024). Kokonaisuudistuksen vaikutuksia eri käyttövoimien kustannuksiin ei pysty tässä vaiheessa arvioimaan.
Työkoneiden Stage-luokitus	Tuotantolaitoksilla ja terminaaleissa käytettävien työkoneiden päästöjen vähentämisvelvoitteet voivat edistää jakeluinfraan toteutusta ko. paikoissa ja siten edistää myös tuotantolaitoksissa ja terminaaleissa asioivien kuorma-autojen sähköistymistä ja muuta käyttövoimamurrosta. Työkoneiden päästörajoja määrittävän Stage-luokituksen ei sisälly tällä hetkellä CO ₂ -päästöjä, mutta niiden sisällyttäminen jatkossa on ollut esillä.

Taulukko 15. Diesel- ja sähkökuorma-autojen vertailuihin vaikuttavia teknisiä ja markkinakehitysnäkymiä.

Akkukapasiteetin ja auton kantaman kasvaminen	Sähköisiä kuorma-autoja alkaa olla jo tarjolla suuremmissakin ajoneuvoyhdistelmien kokoluokissa. Akkujen kasvattaminen ei välttämättä ole enää keskeisessä roolissa, vaan tärkeämpää on esimerkiksi latausinfraan kattavuuden parantaminen ja latausajan lyhentäminen megawattilatausta hyödyntäen. (Pernestål ym. 2023) Auton kantaman piteneminen antaa joustavuutta latausten suunnitteluun siinä vaiheessa, kun latausinfra verkko on vielä suppea.
Akkujen käyttöiän pidentyminen	Akkujen käyttöiällä on tällä hetkellä merkittävä kustannusvaikutus dieselyhdistelmiin verrattaessa. Euro 7 -asetus tulee asettamaan vaatimuksia uusien ajoneuvojen akkujen kestävyydelle (ks. taulukko 14). Myös akkujen korjattavuuden kehittyminen ja uudet akkumateriaalit (esim. litium-rauta-fosfaatti- eli LFP-akut) tulevat nostamaan käyttöikää.
Megawattilataukseen soveltuvat vetoautot	Nopeaan megawattilataukseen (Megawatt Charging System, MCS) soveltuvat vetoautot vähentävät tarvetta lisätä autojen kantamaa ja tarvetta kuljettajan normaalien taukojen ulkopuoliselle lataukselle (ks. luku x.x). Megawattilataukseen soveltuvien vetoautojen tarjonnan oletetaan lisääntyvän, kun megawattilatauksen standardi (SAE J3271) valmistuu 2025, ja megawattilatausta tarjoava latausinfra yleistyy. Standardi ulottuu 3,75 MW:n lataustehoon asti.
Sähkö- ja hybridiakselit sekä akut perävaunuissa (sähköiset perävaunut)	EU:ssa valmisteilla oleva CO ₂ -raja-arvoasetus edellyttää myös perävaunuilta päästöjen vähentämistä. Sähkö- ja hybridiakseleita ajoneuvoyhdistelmän perävaunuissa ja työkoneissa tutkitaan Suomessa mm. Oulun yliopiston koordinoimassa NO DAMAGE -hankkeessa. Sähkö- ja hybridiakseli- vaikutusta kuljetusten kustannuksiin ja päästöihin Suomen olosuhteissa ja yhdistelmien painoluokissa voidaan arvioida paremmin tutkimusten edetessä. Sähköakseleita koskeva kirjallisuuskatsaus on laadittu Nyblomin (2023) opinnäytetyön yhteydessä. Sähköiset perävaunuratkaisut vähentävät ajoneuvoyhdistelmän päästöjä vetoauton käyttövoimasta riippumatta. Sähköiseltä vetoautolta perävaunut vähentävät vaadittavan moottorin teholuokkaa ja lisäävät ajoneuvon kantamaa. Esimerkkejä sähköisten perävaunujen valmistajista ovat VAK Oy ja saksalaiset ZF Friedrichshafen ja Trailer Dynamics. Amerikkalainen Revoy on esitellyt ratkaisun, jossa pieni vetoauton ja puoliperävaunun väliin laitettava linkkivaunu on täynnä akkuja. Tyhjentynyt akkuperävaunu voidaan helposti vaihtaa valmiiksi ladattuun.
Akunvaihtokonseptit	Euroopassa ei ole tällä hetkellä tarjolla kuorma-autojen akunvaihtokonsepteja (Battery Swapping tai BaaS, Battery as a Service), joissa tyhjenevä akku vaihdetaan työpäivän aikana valmiiksi täytettyyn akkuun (Vuorinen 2023). Konseptin käyttöönotto vaatisi mm. ratkaisuiden standardointia. Työkoneissa vaihtoakkukonsepteja puolestaan on käytössä Euroopassakin. DB Schenker kumppaneineen käynnisti syksyllä 2024 selvityksen koskien sähköisen perävaunun akunvaihtoa (Deutsche Bahn 2024). LUT:n tutkimuksessa (Tuviala ym. 2024) on simuloitu akunvaihtokonseptiin perustuvan sähkökuorma-auton eroja dieselkuorma-autoon verrattuna Suomen sisäisessä kuljetuksessa.
Uusiutuvan sähkön osuus	Suomessa tuotetusta sähköstä merkittävä osa on uusiutuvaa (mm. aurinko-, tuuli- ja vesivoimalla sekä bioenergialla tuotettu sähkö). Uusiutuvan sähkön osuus vaikuttaa käyttövoimien elinkaaren aikaisten

	vaikutusten (well-to-wheel) vertailutuloksiin. Uusiutuvan energian osuus on 40 % Suomen energian loppukulutuksesta (Työ- ja elinkeinoministeriö 2024). Osuuden tavoitellaan nousevan yli 50 %:n 2020-luvun aikana. Ydinvoimalla tuotettu sähkö on fossiili- ja hiilidioksidivapaata, mutta sitä ei lasketa uusiutuvaksi sähköksi.
Sähköisen kuorma-auton hankinnan ja latausten suunnittelu	Sähkökuorma-autojen ja latausinfraan valmistajat tarjoavat erilaisia työkaluja, joilla kuljetusyritykset ja kuljettajat voivat optimoida hankittavan sähkökuorma-auton ominaisuuksia ja päiväkohtaista latausten suunnittelua. Tilannekohtaista optimointia hyödyntämällä voidaan saavuttaa suurempiakin etuja sähköisillä kuorma-autoilla kuin tässä raportissa on esitetty. Latauksen optimoinnin tarve vähenee, kun raskaan kaluston latausinfra ja megawattilataus yleistyvät.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

Tämä sähkö- ja dieselaajoneuvoyhdistelmien kustannus- ja päästövertailuselvitys Suomen puutavara- ja hakekuljetuksissa laadittiin loppuvuonna 2024 käytössä olleiden aineistojen pohjalta. **Selvityksessä saadut tulokset ovat alustavia ja koskevat vain tarkasteluun mukaan otettuja tilanteita.** Laskelmia onkin tarpeen päivittää ja täydentää, kun vähintään 68-tonnisten sähkökuorma-autojen sähkönkulutuksesta eri vuodenaikoina, korjaus- ja huoltokustannuksista sekä akkujen kestästä ja hintojen kehittymisestä on enemmän tutkittua tietoa. Suomessa sähköisen puutavarayhdistelmän pilotointia ja seurantatutkimusta on käynnistymässä ACE-hankkeen² yhteydessä. Muita sähkökuorma-autojen tutkimushankkeita ovat mm. ESCALATE³ ja SIX-HOVE⁴. Ruotsissa mm. metsäsektorin sähköisiä yhdistelmiä tutkitaan ja pilotoidaan TREE⁵-, EIRutt⁶- ja REEL⁷-hankkeiden yhteydessä. Myös päästöjen vähentämistä tavoittelevan sääntelyn eteneminen tulee muuttamaan sähkö- ja dieselyhdistelmien välisiä eroja.

Suoriin metsästä-tehtaalle kuljetuksiin sähkökuorma-autot eivät ole tällä hetkellä ominaisuuksiltaan ihanteellisia tyypillisillä (100 km) tai niitä pidemmillä kuljetusmatkoilla. Sähkökuorma-auton soveltuvuus metsäteille vaatii lisätutkimusta. Ruotsissa käynnistytvä puutavara-autojen mobiililatauksen pilotointi tuo lisätietoa kuljetuksen lähtöpään lataushaasteeseen. Sähköiset metsäautot soveltuvat paremmin keskimääräistä lyhyemmille kuljetusmatkoille, joita on mm. alkukuljetuksissa rautatie- ja vesikuljetuksiin (keskimatka noin 50 km). Alkukuljetusvolyymit ovat kuitenkin monilla alueilla pieniä ja vesikuljetusten osalta vain osavuotisia.

Terminaalien ja tehtaiden välisiin puu- ja hakekuljetuksiin sähkökuorma-autot soveltuvat todennäköisemmin, koska:

- keskimääräinen kuljetusmatka on muita puukuljetuksia lyhyempi
- kuljetusreitit ovat säännöllisempiä ja painottuvat päälystetylle tieverkolle. Tällöin lataustarpeen ennakointi on helpompaa ja latausinfra on helpommin toteutettavissa kuljetusreitin eri kohtiin.

Perustason mukaisissa kustannuslaskelmissa sähköisillä metsä- ja terminaaliautoilla ei ollut keskenään suurta kustannuseroa (+7–11 %) dieselyhdistelmiin verrattuna, mutta tämä voi johtua sähkökuorma-autojen vielä puutteellisista kulutustiedoista. Sähköisillä hakeyhdistelmillä oli perustason laskelmissa pienin ero dieselyhdistelmiin nähden (+6 %). Laadittujen herkkyystarkasteluiden mukaan sähköiset metsäautot vähentävät kuljetusten yksikkökustannuksia dieselyhdistelmiin verrattuna niissä tapauksissa, joissa sähkön hinta on 0,15 €/kWh.

Tässä selvityksessä on tarkasteltu sähkökuorma-autojen **päästövähennysvaikutuksia** vain suorien käytönaikaisten päästöjen osalta (tank-to-wheel), jolloin sähkökuorma-autot määritellään nollapäästöisiksi. Laadituissa skenaarioissa voidaan vähentää kotimaisissa puutavara- ja hakekuljetuksissa hiilidioksidipäästöjä yli 40 000 tonnilla vuodessa.

Raskaiden sähkö- ja dieselyhdistelmien kustannus- ja päästölaskelmia on tarpeen päivittää jatkossa mm. tutkimustiedon karttuessa, päästövähennyksiä tavoittelevan sääntelyn yleistyessä, auto-, akku- ja latausinfraan tekniikan kehittyessä sekä sähköauto- ja latausinfrastruktuurin kasvessa. **Jatkotutkimustarpeita** ovat:

- **Sähkökuorma-autojen energiankulutus**

² ACE-hanke:

https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Ilmastoratkaisujen_vauhdittaja_ACE

³ ESCALATE-hanke: <https://cris.vtt.fi/en/projects/powering-eu-net-zero-future-by-escalating-zero-emission-hdvs-and->

⁴ SIX-HOVE-hanke: <https://www.six.fi/hove-projects/six-hove-project>

⁵ TREE-hanke: <https://www.skogforsk.se/english/projects/tree/>

⁶ EIRutt-hanke: <https://www.skogforsk.se/projekt/accelerera-elektrifieringen-av-skogsbrukets-transporter/elrutt/>

⁷ REEL-hanke: <https://closer.lindholmen.se/en/project/reel>

- kulutus eri ajoneuvon painoluokissa, olosuhteissa (mm. lämpötila/vuodenajat, so-
ratie / päällystetty tie, topografia), ajonopeuksissa ja -matkoissa, kuljetustehtävissä
sekä kuormaus- ja purkuvaiheissa
- seuranta- ja simulointitutkimukset
- **Akkuihin liittyvät tutkimus**
 - akkujen kesto suhteessa vetoauton vuorokausi- ja vuosisuoritteeseen, pitoaikaan
ja käyttöikään (ml. akkujen korjattavuuden kehittyminen)
- **Sähkön ja ajoneuvojen elinkaaripäästöjen laskeminen**
- **Perävaunun sähköakselin vaikutuksen tutkiminen**
- **Puutavarayhdistelmän kuormaimen kulutus** (tulossa MESI-hankkeessa keväällä
2025) ja haakeyhdistelmien purkulaitteiden kulutus
- **Sähkökuorma-autojen muut kustannukset**
 - megawattilataukseen sopivan kuorma-auton hankintakustannus
 - korjaus- ja huoltokustannukset dieselautoon verrattuna
- **Latausinfra**
 - julkisen latausinfran kehittyminen (vaikutus kuorma-autolta vaadittavaan kanta-
maan)
 - yksityistä latausinfraa täydentävien akkuvarastojen vaikutukset latausinfran inves-
tointikustannuksiin ja sähkön lataushintoihin.

LÄHTEET

Danebergs J (2024) Förlängd räckvidd med mobil laddning. Kalvoesitys. <https://www.skogforsk.se/cd/20241128145831/contentassets/0130fbaf2d6b442e9ff7b97a8108dc80/9-janis-danebergs.pdf>

Deutsche Bahn (2024) DB Schenker, Trailer Dynamics and CATL start Study for Battery Swapping in eTrailers. Tiedote 10.9.2024. https://www.deutschebahn.com/en/presse/press_releases/DB-Schenker-Trailer-Dynamics-and-CATL-start-Study-for-Battery-Swapping-in-eTrailers-13070182. Viitattu 23.12.2024.

Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä annetun lain muuttamisesta, biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttaineista annetun lain 4 ja 6 §:n muuttamisesta sekä eräiden polttoaineiden elinkaarenaikaisten kasvi-huonekaasupäästöjen vähentämisestä annetun lain kumoamisesta. <https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/DownloadProposalAttachment?proposalId=06eb81dc-1127-4938-86a3-709b8864653d&attachmentId=22606>. Viitattu 9.12.2024.

Huuskonen S (2024) LBG-käyttöisen puutavara-autoyhdistelmän energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt. Pro gradu -tutkielma Itä-Suomen yliopisto.

Juntunen E (2023) Ainespuun autokuljetusten päästövähennyskeinojen kustannusvaikutukset. Pro gradu -tutkielma Itä-Suomen yliopisto. <https://erepo.uef.fi/handle/123456789/29530>

Koljonen T, Silfver T, Soimakallio S, Korene 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). Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:26. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165717/VNTEAS_2024_26.pdf

Käsnänen S, Sirén J, Virtanen E, Takala J (2024) MESI - sähkökuorma-autojen latausinfra selvitys. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Ramboll-MESI-raportti-sahkokuorma-autojen-latausinfra selvitys.pdf>

Liimatainen H, Viri R, Nikula H, Tiikkaja H, Utriainen R (2023) Liikenteen päästövähennys toimenpiteiden kokonaisvaltainen taloudellinen arviointi. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:38. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164944/VNTEAS_2023_38_HEETRA.pdf

Nyblom E (2023) Hybridiakselit raskaan liikenteen perävaunuissa. Kandidaatintyö Tampereen yliopisto. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/149720/NyblomEmil.pdf>

Ojala T, Hokkanen E, Honkasalo N (2024) Kansallinen liikenteen vaihtoehtoisten käyttövoimien jakeluinfraohjelma. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2024:10. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165917/LVM_2024_10.pdf

Palta (2024) Lausunto: Hallituksen esitys laiksi fossiilisen polttoaineen jakelun päästökaupasta. Lausunto 8.10.2024. <https://www.palta.fi/ajankohtaista/lausunnot/lausunto-hallituksen-esitys-laiksi-fossiilisen-polttoaineen-jakelun-paastokaupasta-2/>

Pernestål A, Svenson G, Gustavsson O, Eriksson A (2023) Elektrifiering av skogbrukets vägtransporter – Analys av barriärer och möjligheter. Skogforsk Arbetsrapport 1176-2023.

https://www.skogforsk.se/cd_20231002144715/contentassets/4c2446509a3d4a9ea0f20509d48dce41/arbetsrapport-1176-2023-elektrifiering-av-skogs-brukets-vagtransporter.pdf

Pihlatie M, Ranta M, Rahkola P, Åman R (2023) Zero-Emission Truck Powertrains for Regional and Long-Haul Missions. World Electric Vehicle Journal. <https://www.mdpi.com/2032-6653/14/9/253>

SCA (2024) SCA to introduce world unique electric timber truck. Internetartikkeli 25.3.2024. <https://www.sca.com/en/wood/uk-news-list/sca-to-introduce-world-unique-electric-timber-truck/>. Viitattu 12.12.2024.

Seppälä J, Liimatainen H, Viri R, Suomalainen E, Ollikainen M, Weaver S, Markkanen J, Ahlvik L, Karttunen M, Hänninen O, Halonen J I (2024) Tieliikenteen päästövähennystoimet ja niiden vaikutukset. Suomen Ilmastopaneelin raportti 1/2024. <https://ilmastopaneeli.fi/hallinta/wp-content/uploads/2024/08/ilmastopaneelin-raportti-1-2024-tieliikenteen-paastovahennystoimet-ja-niiden-vaikutukset.pdf>

Sipilä E, Lilja A, Poikolainen H, Ogata T, Kalliovalkama S (2023) Liikenteen uusiutuvien polttoainojen jakeluvalvontajärjestelmän uudistaminen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:50. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165124/VNTEAS_2023_50.pdf

Strandström M (2024) Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2023. Metsätehon tulostietosarja 2/2024. <https://www.metsateho.fi/puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2023/>

Tilastokeskus (2024a) Kotimaan kuorma-autoliikenteen suoritteet tavaralajeittain, 2011-2023. Tilasto. https://statfin.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_kttav/statfin_kttav_pxt_119b.px/. Viitattu 10.12.2024.

Tilastokeskus (2024b) Polttoaineluokitus 2023. https://stat.fi/media/uploads/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_2023.xlsx. Viitattu 3.11.2024.

Tuviala E, Meriläinen A, Hiltunen T, Lindh T, Kauranen P, Ahola J (2024) Simulation Tool to Model the Levelized Cost of Driving of Battery Swapping Heavy Duty Vehicles. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4947306>

Työ- ja elinkeinoministeriö (2024) Uusiutuva energia Suomessa. Verkkosivu. <https://tem.fi/uusiutuva-energia>. Viitattu 11.12.2024.

Uhrdin A, von Hofsten H, Noreland D (2023) Elektrifiering av tunga vägtransporter – mycket mer än teknik. Skogforsk Arbetsrapport 1166–2023. https://www.skogforsk.se/cd_20230621155159/contentassets/a63d7a4e49494e4094f185802c176e74/1166-2023-elektrifiering-av-tunga-vagtransporter---mycket-mer-an-teknik.pdf

Valtioneuvosto (2024) Hallituksen kehysriihi 15.-16.4.2024 – Kasvupaketti. <https://valtioneuvosto.fi/documents/10616/199806183/Kasvupaketti+16.4.2024.pdf/c867e33b-faea-d211-b22a-3b19b2394a89/Kasvupaketti+16.4.2024.pdf>

Valtiovarainministeriö (2024) Liikenteen verotuksen ja rahoituksen kokonaisuudistus käyntiin. Tiedote 9.10.2024. <https://vm.fi/-/194055633/liikenteen-verotuksen-ja-rahoituksen-kokonaisuudistus-kayntiin>

Venäläinen P, Poikela A (2024) Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset - aiheen 4. väliraportti. Metsätehon raportti 270. <https://www.metsateho.fi/puutavara-ja-hakeajoneuvojen-massojen-noston-vaikutukset-2/>

Vuorinen V (2023) Akunvaihto – teknologiat, sovellukset ja markkinat. Sähkötekniikan kandidaatintyö, Lappeenrantaan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/165410/kandidaatintyo_vuorinen_veeti.pdf

Werre A (2023) Simulering av effektbehovet på industrier och terminaler vid elektrifiering av skogstransporter. Opinnäytetyö Sveriges lantbruksuniversitet. <https://stud.epsilon.slu.se/19051/>

Liite 1 Lataus- ja taukoajojen yhdistäminen

Esimerkki 1

Ajoneuvoyhdistelmä	76MS		Latauspisteiden lkm	2	
Latausteho kW	350		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	37,5	
Akun varaus työpäivän alussa (70 % SOC)	407				
Metsän ja tehtaan etäisyys (km)	100				
Työvuorojen lkm	3				
Työvuoron kesto (h)	8				
Matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus (kWh)	Tauko/työaika (min)
Kuljettaja 1 aloittaa 00:00					
Purku	42	42	0:42	390	0
Ajo 100	87	129	2:09	217	0
Kuormaus	60	189	3:08	182	0
Lataus	45	234	3:53	445	45
Ajo 100	94	328	5:27	157	0
Purku	42	370	6:10	140	0
Lataus	35	405	6:45	344	35
Ajo 100	87	492	8:12	172	0
Kuljettaja 1 lopettaa ja Kuljettaja 2 aloittaa 8:12					0
Kuormaus	60	552	9:11	137	0
Lataus	35	587	9:46	376	35
Ajo 100	94	681	11:20	88	0
Purku	42	723	12:03	71	0
Lataus	45	768	12:48	334	45
Ajo 100	87	855	14:14	161	0
Kuormaus	60	914	15:14	126	0
Lataus	35	949	15:49	331	35
Kuljettaja 2 lopettaa ja Kuljettaja 3 aloittaa 15:49					0
Ajo 100	94	1044	17:23	43	0
Lataus	45	1089	18:08	305	45
Purku	42	1131	18:50	288	0
Ajo 100	87	1218	20:17	116	0
Kuormaus	60	1277	21:17	81	0
Lataus	45	1322	22:02	343	45
Ajo 100	94	1416	23:36	56	0
Purku	42	1459	0:18	39	0

Esimerkki 2

Ajoneuvoyhdistelmä	76MS		Latauspisteiden lkm	2	
Latausteho kW	350		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	22,5	
Akun varaus työpäivän alussa	582				
Metsän ja tehtaan etäisyys (km)	100				
Työvuorojen lkm	2				
Työvuoron kesto (h)	~10				
Matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus (kWh)	Tauko/työaika (min)
Kuljettaja 1 aloittaa 4:00			4:00		
Purku	42	42	4:42	565	0
Ajo 100	87	129	6:09	392	0
Kuormaus	60	189	7:08	357	0
Ajo 100	94	283	8:42	70	0
Lataus	45	328	9:27	332	45
Purku	42	370	10:10	315	0
Ajo 100	87	457	11:37	143	0
Kuormaus	60	517	12:36	108	0
Lataus	45	562	13:21	370	45
Ajo 100	94	656	14:55	83	0
Kuljettaja 1 lopettaa 14:55					
Kuljettaja 2 aloittaa 16:00			16:00		
Lataus -> 582 kWh					0
Purku	42	42	16:42	565	0
Ajo 100	87	129	18:09	392	0
Kuormaus	60	189	19:08	357	0
Ajo 100	94	283	20:42	70	0
Lataus	45	328	21:27	332	45
Purku	42	370	22:10	315	0
Ajo 100	87	457	23:37	143	0
Kuormaus	60	517	0:36	108	0
Lataus	45	562	1:21	370	45
Ajo 100	94	656	2:55	83	0

Esimerkki 3

Ajoneuvoyhdistelmä	76TS		Latauspisteiden lkm	2	
Latausteho kW	350		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	35,9	
Akun varaus työpäivän alussa (70 % SOC)	407				
Tehtaan ja terminaalien etäisyys (km)	100				
Työvuorojen lkm	3				
Työvuoron kesto (h)	8				
Matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus	Tauko aika (min)
Kuljettaja 1 aloittaa 0:00					
Purku	38	38	0:37	405	0
Ajo 100	87	125	2:04	233	0
Kuormaus	40	165	2:45	231	0
Lataus	30	210	3:30	407	45
Ajo 100	94	304	5:04	119	0
Purku	38	342	5:41	119	0
Lataus	45	387	6:26	382	45
Ajo 100	87	474	7:53	209	0
Kuljettaja 1 lopettaa ja Kuljettaja 2 aloittaa 7:53					
Kuormaus	40	514	8:34	207	0
Lataus	34	548	9:08	407	34
Ajo 100	94	642	10:42	119	0
Purku	38	680	11:20	118	0
Lataus	45	725	12:05	380	45
Ajo 100	87	812	13:32	208	0
Kuormaus	40	852	14:12	206	0
Lataus	35	887	14:46	407	35
Ajo 100	94	981	16:21	119	0
Kuljettaja 2 lopettaa ja Kuljettaja 3 aloittaa 16:20					
Purku	38	1019	16:58	118	0
Lataus	30	1049	17:28	293	30
Ajo 100	87	1136	18:55	120	0
Kuormaus	40	1176	19:36	118	0
Lataus	45	1221	20:21	381	45
Ajo 100	94	1315	21:55	93	0

Esimerkki 4

Ajoneuvoyhdistelmä	76TS		Latauspisteiden lkm	2	
Latausteho kW	350		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	17,4	
Akun varaus vuoron alussa	582				
Matka tehtaalta terminaaliin	100				
Työvuorojen lkm	2				
Työvuoron kesto	~10				
Ajettu matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus	Taukoaika
Kuljettaja 1 aloittaa klo 4:00					
Purku	38	38	4:37	580	0
Ajo 100	86,9	125	6:04	408	0
Kuormaus	40	165	6:45	406	0
Ajo 100	94	259	8:19	118	0
Lataus	45	304	9:04	381	45
Purku	38	342	9:41	379	0
Ajo 100	87	429	11:08	206	0
Kuormaus	40	469	11:49	204	0
Lataus	35	504	12:23	407	35
Ajo 100	94	598	13:57	119	0
Kuljettaja 2 aloittaa 16:00					
Lataus 582 kWh			16:00	582	0
Purku	38	38	16:37	580	0
Ajo 100	87	125	18:04	408	0
Kuormaus	40	165	18:45	406	0
Ajo 100	94	259	20:19	118	0
Lataus	45	304	21:04	381	45
Purku	38	342	21:41	379	0
Ajo 100	87	429	23:08	206	0
Kuormaus	40	469	23:49	204	0
Lataus	35	504	0:23	407	35
Ajo 100	94	598	1:57	119	0

Esimerkki 5

Ajoneuvoyhdistelmä	76TS		Latauspisteiden lkm	1	(purkupaikalla)
Latausteho kW	350		min/kuorma	16	
Akun varaus työpäivän alussa (70 % SOC)	407				
Tehtaan ja terminaalien etäisyys (km)	50				
Työvuorojen lkm	3				
Työvuoron kesto (h)	7:27				
Ajettu matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasuma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus	Tauko aika
Kuljettaja 1 aloittaa 0:00					
Purku	36	36	0:35	399	0
Ajo 50	48	84	1:23	315	0
Kuormaus	40	124	2:03	306	0
Ajo 50	52	176	2:56	165	0
Purku	36	212	3:31	157	0
Lataus	45	257	4:16	420	45
Ajo 50	48	305	5:04	335	0
Kuormaus	40	345	5:45	327	0
Ajo 50	52	398	6:37	186	0
Purku	36	433	7:13	178	0
Lataus	40	473	7:53	411	40
Kuljettaja 1 lopettaa ja Kuljettaja 2 aloittaa					
Ajo 50	48	521	8:41	327	0
Kuormaus	40	561	9:21	318	0
Ajo 50	52	614	10:13	178	0
Purku	36	649	10:49	170	0
Lataus	45	694	11:34	432	45
Ajo 50	48	742	12:22	348	0
Kuormaus	40	783	13:02	339	0
Ajo 50	52	835	13:55	199	0
Purku	36	871	14:30	191	0
Lataus	35	906	15:05	395	35
Kuljettaja 1 lopettaa ja Kuljettaja 2 aloittaa					
Ajo 50	48	954	15:53	311	0
Kuormaus	40	994	16:34	302	0
Ajo 50	52	1046	17:26	161	0
Purku	36	1082	18:01	153	0
Lataus	45	1127	18:46	416	45
Ajo 50	48	1175	19:35	332	0
Kuormaus	40	1215	20:15	323	0
Ajo 50	52	1268	21:07	182	0
Purku	36	1303	21:43	174	0
Lataus	40	1343	22:23	407	40
Ajo 50	48	1391	23:11	323	0
Kuormaus	40	1432	23:51	314	0
Ajo 50	52	1484	0:44	174	0

Esimerkki 6

Ajoneuvoyhdistelmä	76TS		Latauspisteiden lkm	2	
Latausteho kW	350		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	5	
Akun varaus vuoron alussa	582				
Matka tehtaalta terminaaliin (km)	50				
Työvuorojen lkm	2				
Työvuoron kesto (h)	~10				
Ajettu matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus	Tauko aika (min)
Kuljettaja 1 aloittaa 4:00					
Purku	36	36	4:35	574	0
Ajo 50	48	84	5:23	490	0
Kuormaus	40	124	6:03	481	0
Ajo 50	52	176	6:56	340	0
Purku	36	212	7:31	332	0
Ajo 50	48	260	8:19	248	0
Kuormaus	40	300	9:00	239	0
Lataus	45	345	9:45	407	45
Ajo 50	52	398	10:37	267	0
Purku	36	433	11:13	258	0
Ajo 50	48	481	12:01	174	0
Kuormaus	40	521	12:41	165	0
Lataus	15	536	12:56	253	15
Ajo 50	52	589	13:48	113	0
Kuljettaja 1 lopettaa 13:48					
Kuljettaja 2 aloittaa 16:00					
Lataus -> 582kWh					
Purku	36	36	16:35	574	0
Ajo 50	48	84	17:23	490	0
Kuormaus	40	124	18:03	481	0
Ajo 50	52	176	18:56	340	0
Purku	36	212	19:31	332	0
Ajo 50	48	260	20:19	248	0
Kuormaus	40	300	21:00	239	0
Lataus	29	329	21:28	407	45
Ajo 50	52	381	22:21	267	0
Purku	36	417	22:56	258	0
Ajo 50	48	465	23:44	174	0
Kuormaus	40	505	0:25	165	0
Lataus	15	520	0:40	253	15
Ajo 50	52	573	1:32	113	0

Esimerkki 7

Ajoneuvoyhdistelmä	76HS		Latauspisteiden lkm	2	
Latausteho kW	350		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	36,4	
Akun varaus työpäivän alussa (70 % SOC)	407				
Tehtaan ja terminaalien etäisyys (km)	100				
Työvuorojen lkm	3				
Työvuoron kesto (h)	8				
Ajettu matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus	Tauko aika (min)
Purku	27	27	0:26	391	0
Ajo 100	87	114	1:53	214	0
Kuormaus	35	148	2:28	207	0
Lataus	45	193	3:13	469	45
Ajo 100	94	288	4:47	175	0
Purku	43	330	5:30	159	0
Lataus	45	375	6:15	421	45
Ajo 100	87	462	7:42	244	0
Kuljettaja 1 lopettaa ja Kuljettaja 2 aloittaa 7:42					0
Kuormaus	35	497	8:16	237	0
Lataus	29	526	8:46	407	29
Ajo 100	94	620	10:20	112	0
Purku	43	663	11:03	96	0
Lataus	53	716	11:56	407	53
Ajo 100	87	803	13:23	230	0
Kuormaus	35	838	13:57	223	0
Lataus	32	869	14:29	407	32
Ajo 100	94	964	16:03	112	0
Kuljettaja 2 lopettaa ja Kuljettaja 3 aloittaa 15:52					
Purku	43	1006	16:46	96	0
Lataus	45	1051	17:31	359	45
Ajo 100	87	1138	18:58	182	0
Kuormaus	35	1173	19:33	175	0
Lataus	40	1213	20:12	407	40
Ajo 100	94	1307	21:46	112	0
Purku	43	1350	22:29	96	0

Esimerkki 8

Ajoneuvoyhdistelmä	76M5		Latauspisteiden lkm	2 (toinen puolimatassa)	
Latausteho kW	350		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	45	
Akun varaus työpäivän alussa (70 % SOC)	407				
Metsän ja tehtaan etäisyys (km)	0:00				
Työvuorojen lkm	3				
Työvuoron kesto (h)	8				
Matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus (kWh)	Tauko/työaika (min)
Kuljettaja 1 aloittaa 00:00					
Purku	42	42	0:42	390	0
Ajo 100	87	129	2:09	217	0
Kuormaus	60	189	3:08	182	0
50	47	236	3:55	39	0
Lataus	45	281	4:40	301	45
50	47	328	5:27	157	0
Purku	42	370	6:10	140	0
50	43	414	6:53	54	0
Lataus	45	459	7:38	316	45
Kuljettaja 1 lopettaa ja Kuljettaja 2 aloittaa 7:38					
50	43	43	0:43	230	0
Kuormaus	60	518	8:38	195	0
50	47	565	9:25	51	0
Lataus	45	610	10:10	314	45
50	47	657	10:57	170	0
Purku	42	700	11:39	153	0
50	43	743	12:23	67	0
Lataus	45	788	13:08	329	45
50	43	831	13:51	243	0
Kuormaus	60	891	14:50	208	0
50	47	938	15:38	64	0
Lataus	45	983	16:23	327	45
Kuljettaja 2 lopettaa ja Kuljettaja 3 aloittaa 16:23					
50	47	1030	17:10	183	0
Purku	42	1072	17:52	166	0
50	43	1116	18:35	80	0
Lataus	45	1161	19:20	342	45
50	43	1204	20:04	256	0
Kuormaus	60	1264	21:03	221	0
50	47	1311	21:50	77	0
Lataus	45	1356	22:35	340	45
50	47	1403	23:22	196	0

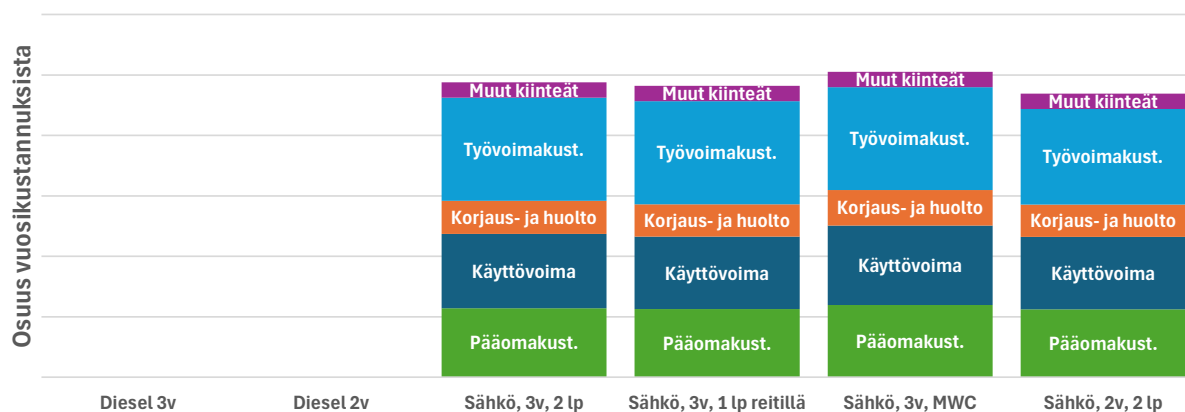
Esimerkki 9

Ajoneuvoyhdistelmä	76MS		Latauspisteiden lkm	2	
Latausteho kW	1000		Ylimääräistä taukoa min/kuorma	16,3	
Akun varaus työpäivän alussa (70 % SOC)	407				
Metsän ja tehtaan etäisyys (km)	100				
Työvuorojen lkm	3				
Työvuoron kesto (h)	8				
Matka / Työvaihe	Käytetty aika (min)	Aikasumma (min)	Aikasumma (hh:mm)	Akun varaus (kWh)	Tauko/työaika (min)
Kuljettaja 1 aloittaa 00:00					
Purku	42	42	0:42	390	0
Ajo 100	87	129	2:09	217	0
Kuormaus	60	189	3:08	182	0
Lataus	13	234	3:53	407	45
Ajo 100	94	328	5:27	119	0
Lataus	17	345	5:45	407	17
Purku	42	387	6:27	390	0
Ajo 100	87	474	7:54	217	0
Lataus	11	486	8:05	407	0
Vuoronvaihto Kuljettaja 1 lopettaa ja Kuljettaja 2 aloittaa 8:07					
Kuormaus	60	545	9:05	372	0
Ajo 100	94	639	10:39	84	0
Lataus	19	684	11:24	407	45
Purku	42	727	12:06	390	0
Ajo 100	87	813	13:33	217	0
Kuormaus	60	873	14:33	182	0
Lataus	13	886	14:46	407	13
Ajo 100	94	981	16:20	119	0
Vuoronvaihto Kuljettaja 2 lopettaa ja Kuljettaja 3 aloittaa 16:23					
Lataus	17	998	16:37	407	17
Purku	42	1040	17:20	390	0
Ajo 100	87	1127	18:47	217	0
Kuormaus	60	1187	19:46	182	0
Lataus	13	1232	20:31	407	45
Ajo 100	94	1326	22:05	119	0
Lataus	17	1343	22:22	407	17

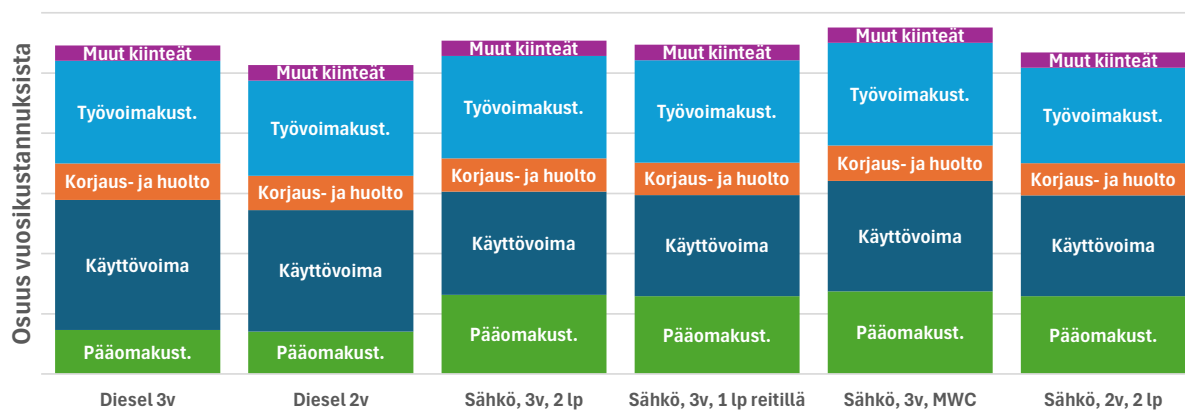
LIITE 2a. Metsäauton vuosikustannukset eri herkkyyssanalyysissä



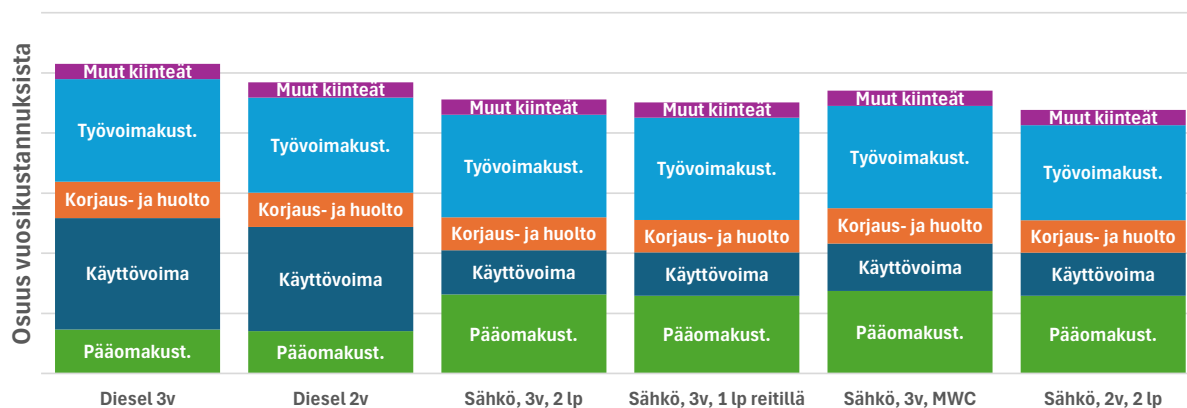
Perustasolaskelma metsäauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



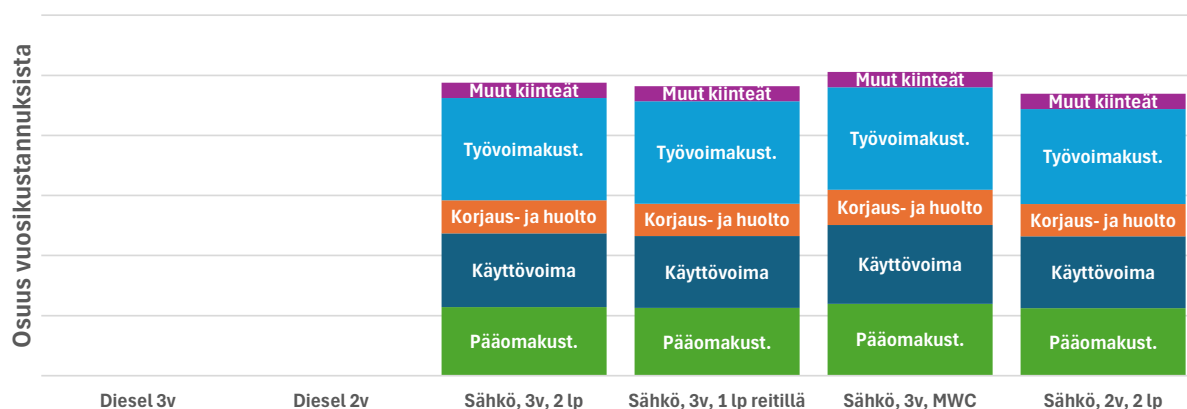
Hankintahinta- laskelma metsäauton vuosikustannuksesta (-100 000 vetoauton hankintahinta; 1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



Käyttövoima+ -laskelma metsäauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,685 €/l, 0,35 €/kWh, 350 kW)

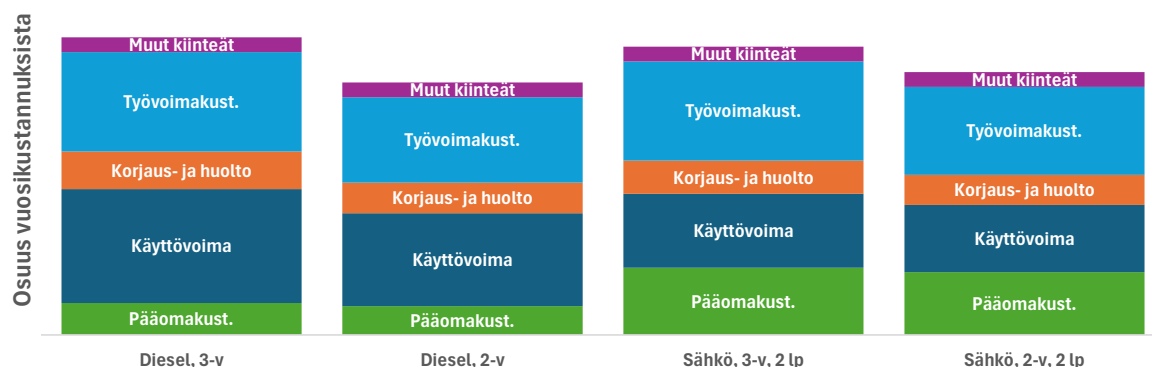


Käyttövoima- -laskelma metsäauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,445 €/l, 0,15 €/kWh, 350 kW)

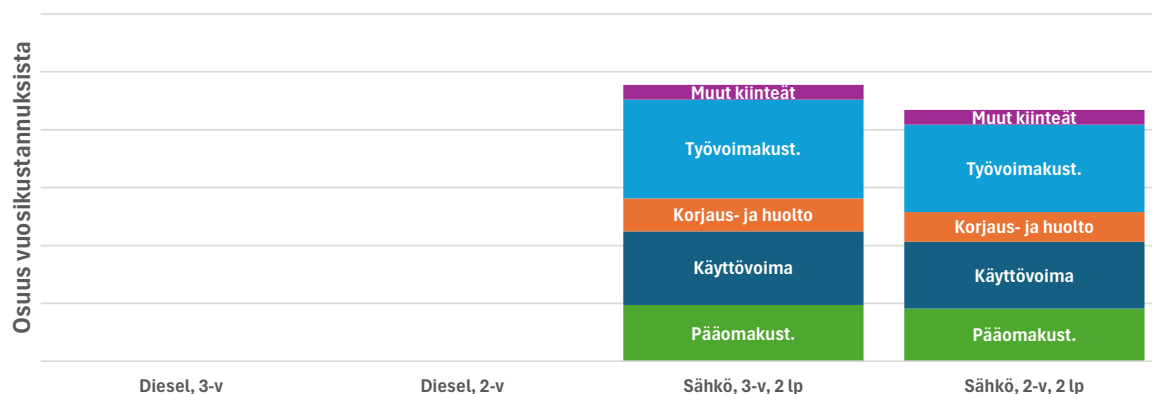


Akun kesto+ -laskelma metsäauton vuosikustannuksesta (0 akunvaihtoa; 1,685 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)

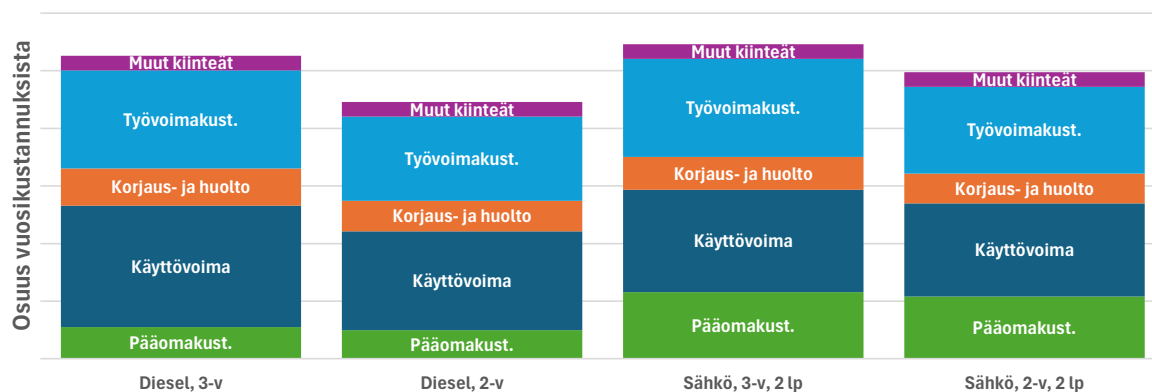
LIITE 2b1. Terminaaliauton (100 km) vuosikustannukset eri herkkyyssanalyysseissa



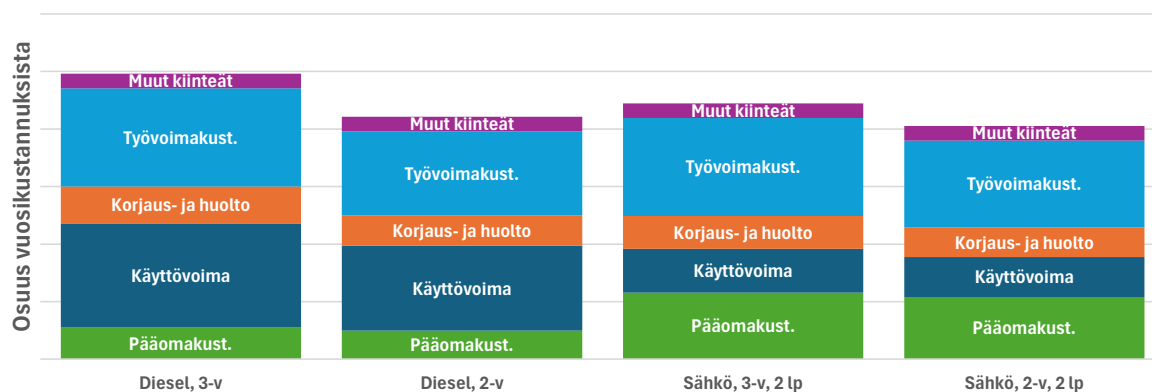
Perustasolaskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



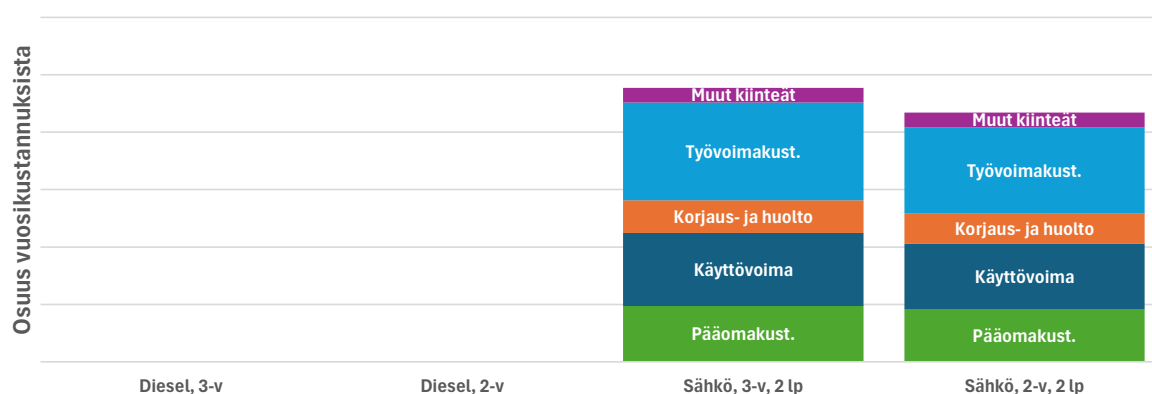
Hankintahinta- laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (-100 000 vetoauton hankintahinta; 1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



Käyttövoima+ laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,685 €/l, 0,35 €/kWh, 350 kW)

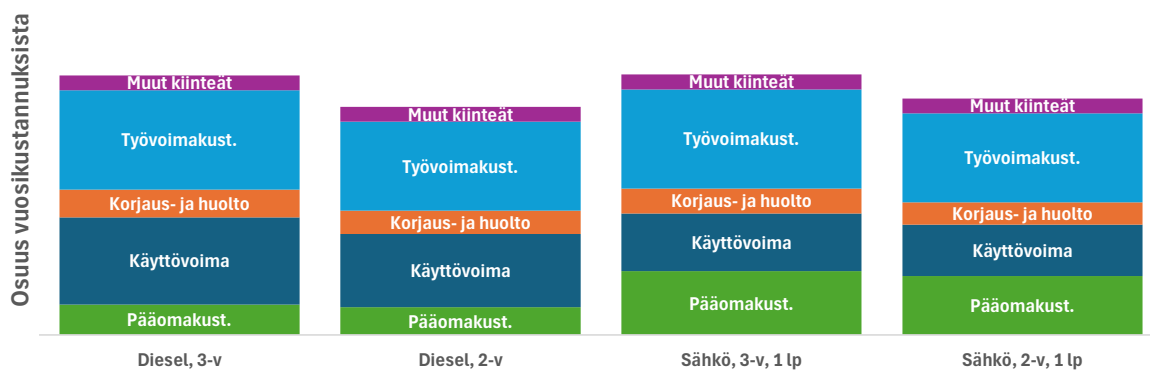


Käyttövoima- -laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,445 €/l, 0,15 €/kWh, 350 kW)

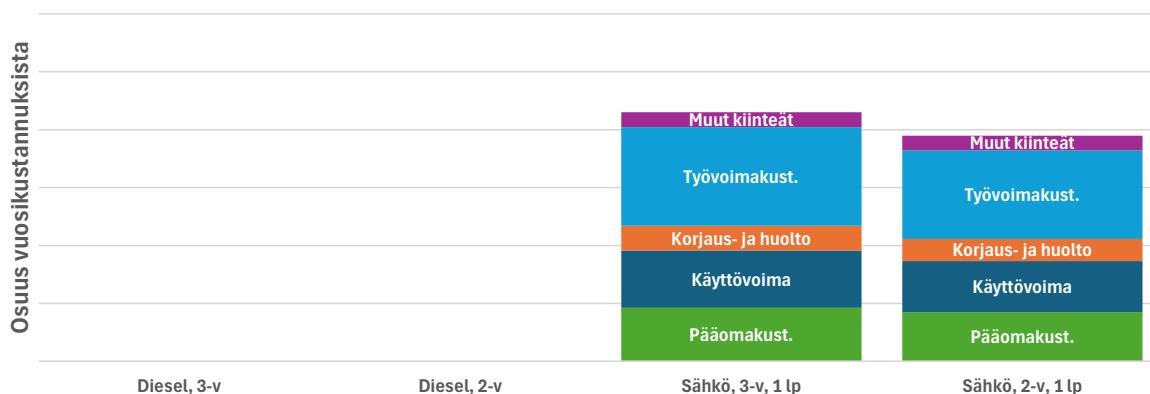


Akun kesto+ -laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (0 akunvaihtoa; 1,685 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)

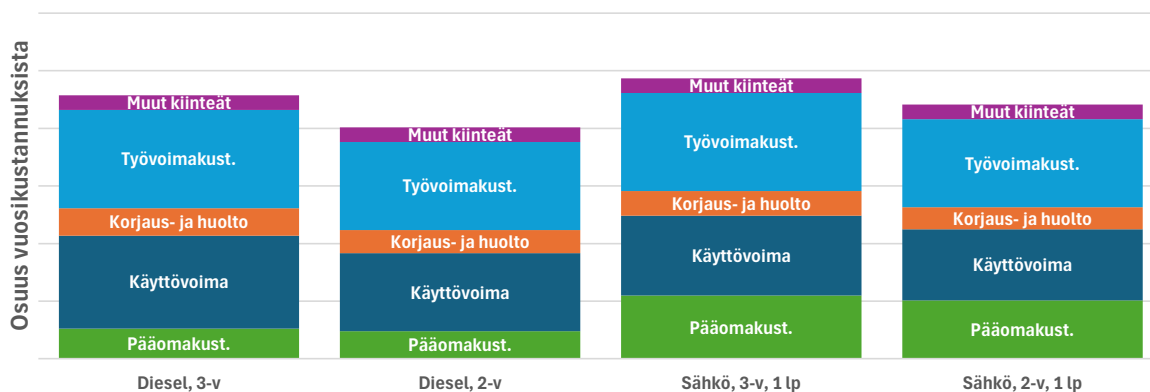
LIITE 2b2. Terminaaliauton (50 km) vuosikustannukset eri herkkyysanalyysissä



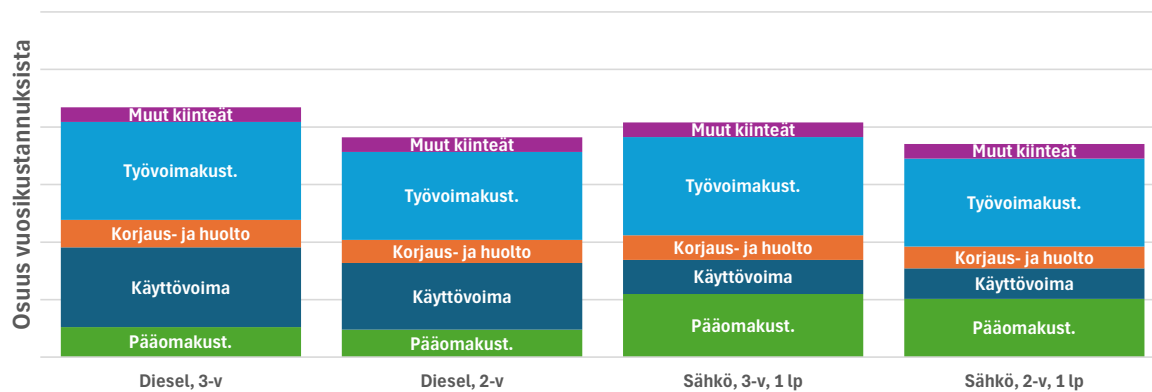
Perustaselaskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



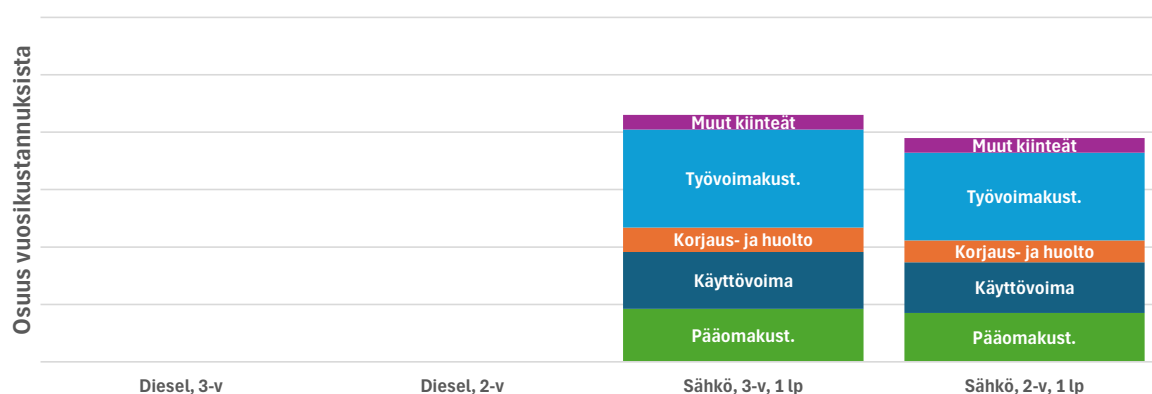
Hankintahinta- laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (-100 000 vetoauton hankintahinta; 1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



Käyttövoima+ laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,685 €/l, 0,35 €/kWh, 350 kW)

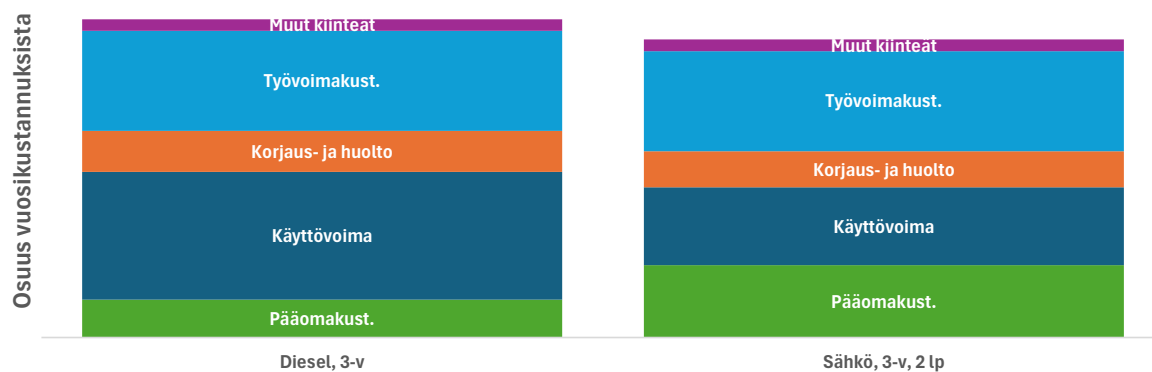


Käyttövoima- -laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,445 €/l, 0,15 €/kWh, 350 kW)

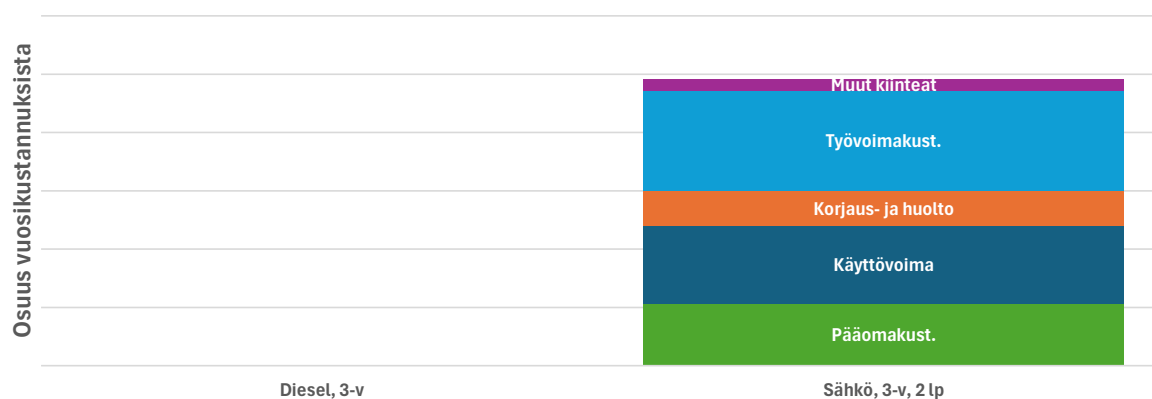


Akun kesto+ -laskelma terminaaliauton vuosikustannuksesta (0 akunvaihtoa; 1,685 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)

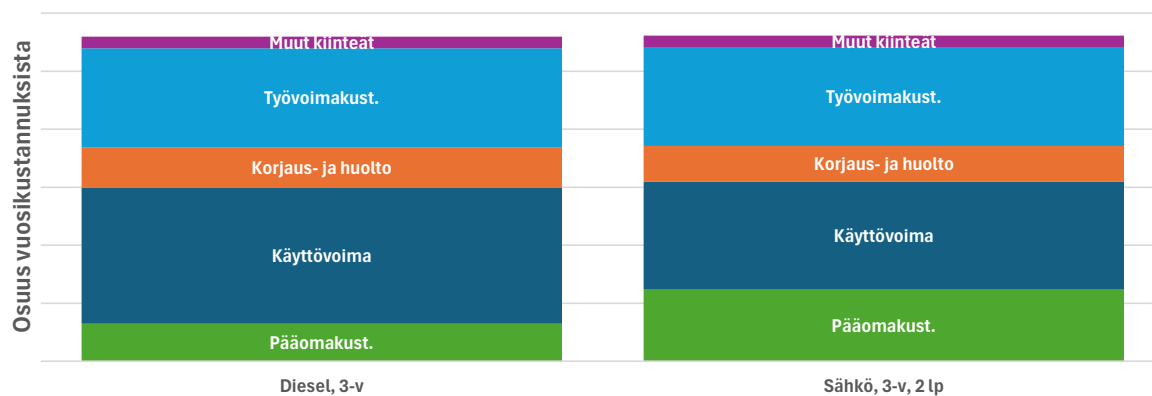
LIITE 2c. Hakeauton vuosikustannukset eri herkkyyssanalyysseissa



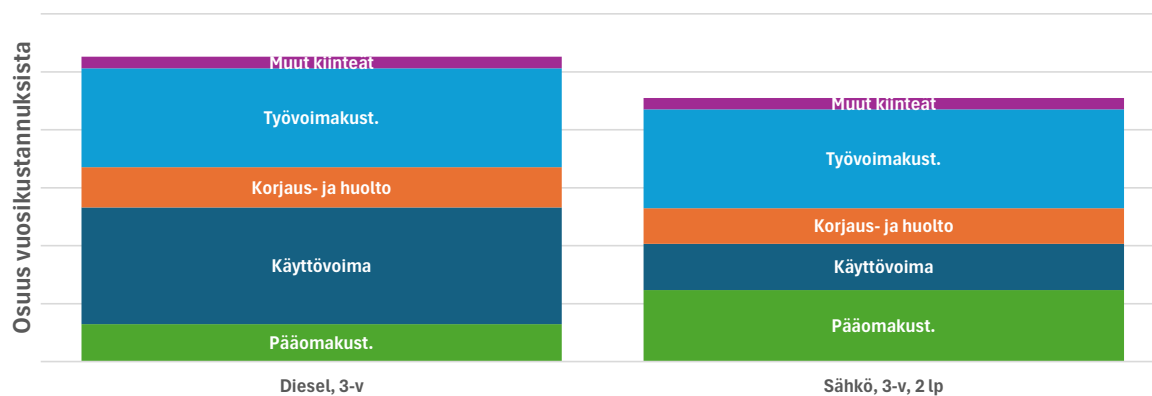
Perustasolaskelma hakeauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



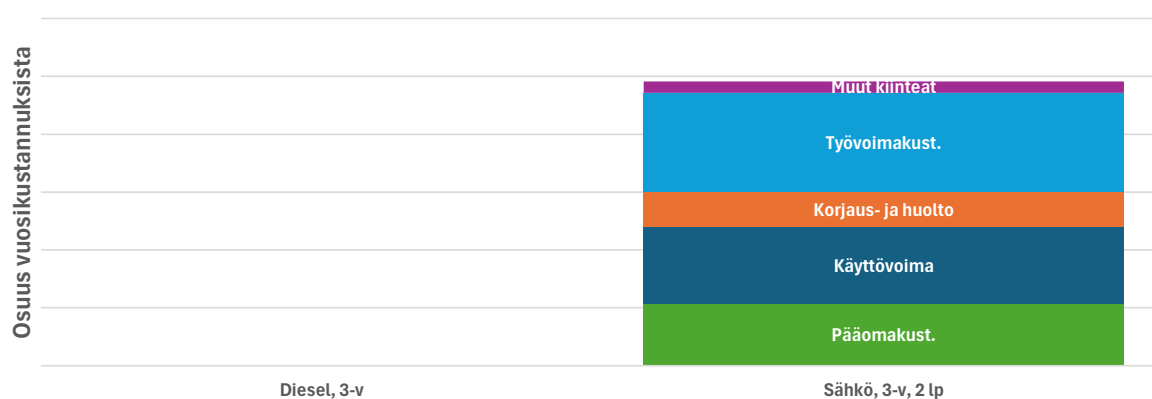
Hankintahinta- laskelma hakeauton vuosikustannuksesta (-100 000 vetoauton hankintahinta; 1 akunvaihto; 1,565 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)



Käyttövoima+ -laskelma hakeauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,685 €/l, 0,35 €/kWh, 350 kW)



Käyttövoima- -laskelma hakeauton vuosikustannuksesta (1 akunvaihto; 1,445 €/l, 0,15 €/kWh, 350 kW)



Akun kesto+ -laskelma hakeauton vuosikustannuksesta (0 akunvaihtoa; 1,685 €/l, 0,25 €/kWh, 350 kW)